

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

Marco Aurélio Coppini

Influência do ácido polifosfórico em misturas asfálticas quentes e mornas

Joinville, 2016

Marco Aurélio Coppini

Influência do ácido polifosfórico em misturas asfálticas quentes e mornas

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no Centro de Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Yader Alfonso Guerrero Pérez

Joinville, 2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Coppini, Marco Aurélio

Influência do ácido polifosfórico em misturas asfálticas
quentes e mornas / Marco Aurélio Coppini ; orientador,
Yader Alfonso Guerrero - Joinville, SC, 2016.
102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.
Graduação em Engenharia de Infraestrutura.

Inclui referências

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Ácido Polifosfórico.
3. Misturas Mornas. 4. Metodologia Marshall. 5. Rediset.
I. Guerrero, Yader Alfonso. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Infraestrutura.
III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, meus pais Walter e Inez e irmã, Alessandra, pelo amparo, dedicação e, principalmente, pela educação que me proporcionaram e proporcionam até hoje.

Aos meus avós, Mário, Assunta (*in memorian*), Antonieta e Nelson (*in memorian*), por me mostrarem que viver feliz é a coisa mais simples e fácil que se possa imaginar.

Ao meu orientador, Yader, pelo constante apoio e dedicação à realização deste trabalho.

Às empresas Vogelsanger e CBB Asfalto, pela doação dos materiais utilizados neste estudo.

Aos meus amigos de minha cidade natal, Rafael, Lucas, Pedro, Leonardo, Thyago, Henrique, Guilherme, Bernardo, Luan, João Paulo e Igor, por me mostrarem, nestas duas décadas de amizade, que sair do interior para conquistar um lugar de respeito na sociedade não é um desafio, é um privilégio.

Aos meus amigos de universidade, Gabriel, Caio, Wiliam, Thomáz, Calvin, Rodrigo, Felipe, Vinícius, Leonardo, Evandro, Ramon, Rodrigo, Thiago, Henrique, Guilherme, Lucas e Fernando, por se tornarem minha família nestes anos extremamente importantes e que nunca serão esquecidos.

À Beatriz e à Charlotte, pela dedicação e companheirismo nestas difíceis etapas finais da graduação.

À família Haag, que por muito tempo foi minha segunda família, me ensinando que valores e um convívio interpessoal é o que nos torna humanos.

Aos também estudantes e amigos: Pedro Zagolin e Rodrigo Siroma, por compartilharem informações, dados, medos e angústias nesta fase final, o TCC. E, ainda, ao Gustavo Araldi, pelos inúmeros auxílios em laboratório.

À Empreiteira Fortunato, pelos últimos 10 meses de constante aprendizado, satisfação e amizade provinda de todos que a compõe.

Por fim, agradeço a banca avaliadora, Prof. Yader Alfonso Guerrero Perez, Prof. Breno Salgado Barra, Prof. Marcelo Heidemann e Eng. Sérgio Marcon, pela disponibilidade e interesse em participar deste exame.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a análise da influência do ácido polifosfórico (PPA) em misturas asfálticas usinadas a quente e misturas asfálticas mornas, produzidas a partir de um ligante modificado com o aditivo Rediset. A metodologia Marshall, em função de ser a mais utilizada no Brasil, foi escolhida como a metodologia de trabalho a ser seguida para a elaboração dos corpos de prova e ensaios deste estudo. A escolha da curva granulométrica utilizada para as misturas foi feita a partir da fórmula de Talbot-Furol. O material granular foi cedido pela empresa Vogelsanger, enquanto o ligante pela empresa CBB Asfaltos. Ao todo, foram elaborados 56 corpos de prova Marshall, sendo 25 para uma mistura realizada com o CAP 7-10 PPA, provindo de uma modificação com ácido polifosfórico de um CAP 50-70 (fornecido já modificado pela empresa) e outros 25 produzidos com a mesma curva granulométrica, desta vez, com o CAP 7-10 PPA modificado com o aditivo surfactante Rediset. Durante o processo de mistura e até mesmo de caracterização dos ligantes, o ácido polifosfórico provocou um aumento considerável da rigidez do ligante, se comparado ao CAP 50-70 antes de modificado. Esta viscosidade, medida diretamente pelo viscosímetro Brookfield, levou a usinagem da mistura a temperaturas acima de 200°C. Já com o auxílio do Rediset, esta temperatura pôde ser reduzida em 30°C, sem perda aparente de trabalhabilidade, porém com uma perda de viscosidade não esperada. A escolha do teor de trabalho da mistura se deu através da análise e interpretação dos gráficos representativos do ensaio de estabilidade e fluência Marshall. A análise destes parâmetros dados pelos corpos de prova ensaiados levaram a um teor de trabalho de 6,25%. Em seguida, outros 3 corpos de prova de ambas as misturas estudados foram elaborados com este teor de trabalho encontrado, totalizando os últimos 6 corpos de prova produzidos. Para estes CP's foi realizado o ensaio de Resistência a Tração Indireta (RTI). Posteriormente, todos os resultados foram comparados com outros dois estudos prévios que utilizaram a mesma curva granulométrica com material granular de mesma origem e CAP 50-70, com e sem Rediset. A análise final indicou que o PPA, como único aditivo na mistura, não provocou grandes melhoras nos ensaios de estabilidade e fluência Marshall se comparado com o CAP 50-70 convencional, embora o aumento de rigidez do ligante seja incontestável. Já para a mistura em que o PPA e o Rediset se encontram presentes, foi verificado um aumento na estabilidade Marshall quando comparado com a mistura apenas com Rediset. A comparação dos resultados RTI das misturas analisadas neste trabalho mostraram um grande aumento de resistência quando o Rediset é adicionado a mistura junto ao PPA. O resultado apresentado pela mistura com Rediset aponta um aumento de 35% na resistência a tração se comparado a mistura modificada apenas com PPA. Por fim, os resultados RTI da mistura com CAP 7-10 PPA modificado com Rediset foram comparados com a mistura do CAP 50-70 modificado apenas com Rediset. Este comparativo mostrou um aumento de quase 90% de resistência quando o PPA é adicionado a mistura.

Palavras-chave: Ácido Polifosfórico; Rediset; Misturas mornas; Metodologia Marshall; Resistência a Tração Indireta.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the influence of polyphosphoric acid (PPA) in hot mix asphalt and warm mix asphalt, produced from a binder modified with Rediset. The Marshall methodology, due to be the most used in Brazil, was chosen as the working methodology to be followed for the preparation of specimens and testing of this study. The choice of the grading curve used for mixtures was made from the Talbot-Furol formula. The granular material was donated by Vogelsanger Minérios, while the binder by the company CBB Asfaltos. In all, 56 Marshall specimens were prepared, 25 for admixture with the CAP 7-10 PPA, coming from a modification with polyphosphoric acid from a CAP 50-70 (supplied already modified by the company) and other 25 produced with the same grading curve, this time, with the CAP 7-10 PPA modified with a surfactant additive, Rediset. During the mixing process, and even characterization of binders, the polyphosphoric acid showed a considerable increase in binder stiffness as compared to the CAP 50-70 before the modification. This viscosity, measured directly by Brookfield viscometer led to machining of the mixture at temperatures above 200°C. Although, with the aid of Rediset, this temperature could be reduced by 30°C with no apparent loss of workability, but with a loss of viscosity which was not expected. The choice of bitumen labor content of the mix was made through the analysis and interpretation of representative graphics of the Marshall stability and fluency Test. The analysis of these parameters given by the test specimens led to a 6.25% bitumen labor content. Then, other 3 specimens of both studied mixtures were prepared with the bitumen labor content found, totaling the last 6 produced specimens. For these CPs it was conducted the Indirect Traction Resistance Test (RTI). Later, all the results were compared with two previous studies using the same grading curve with granular material of the same origin and CAP 50-70, with and without Rediset. The final analysis may conclude that the PPA as the only additive in the mixture showed no major improvement in Marshall stability and fluency tests when compared with conventional CAP 50-70, while the increase in binder stiffness is undisputed. As for the mixture in which the PPA and Rediset presents, was shown an increase in Marshall stability when compared with the mixture only Rediset. The comparison of the results RTI mixtures analyzed in this study, showed a large increase in resistance when the Rediset is added to the mixture with the PPA. The result presented by admixture with Rediset points a 35% increase in tensile strength compared to the mixture only modified PPA. Finally, the RTI results of the mixture with CAP 7-10 PPA modified with Rediset were compared with a mixture of CAP 50-70 modified only with Rediset. This comparison showed an resistance increase of nearly 90% when the PPA is added to the mixture.

Keywords: polyphosphoric acid; Rediset; warm mixes; Marshall methodology; Indirect Traction Resistance.

LISTA DE ABREVIações

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP Cimento Asfáltico de Petróleo
CP Corpo de Prova
DEINFRA Departamento Estadual de Infraestrutura
DNER Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ES Especificação de Serviço
ME Método de Ensaio
NBR Norma Brasileira
RBV Relação Betume/Vazios
SC Santa Catarina
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina
Vv Volume de Vazios
VAM Volume de Vazios do Agregado Mineral
VCB Vazios Cheios de Betume
Dr Densidade Real
DMT Densidade Máxima Teórica
Gmb Massa Específica Aparente
RTI Resistência a Tração Indireta
PPA Ácido Polifosfórico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Procedimento para o alcance do objetivo	17
Figura 2 - Diferença entre tipos de pavimentos rígidos e flexíveis.....	18
Figura 3 - Tipos de curvas granulométricas	22
Figura 4 - Classificação de misturas por granulometria	27
Figura 5 - Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (números aproximados).....	27
Figura 6 - Ligante Saudita sem PPA (esquerda) e com adição de PPA (direita).....	31
<i>Figura 7 - Ligante Venezuelano sem PPA (esquerda) e com adição de PPA (direita)</i>	31
Figura 8 - Rediset em temperatura ambiente.....	34
Figura 9 - Fluxograma do Método Superpave.....	38
Figura 10 - Níveis de Formulação de Ensaios	40
Figura 11 - Resultados Marshall para mistura asfáltica com CAP 50-70 convencional	43
Figura 12 - Estabilidade e Fluência Marshall CAP 50-70 Convencional / CAP 50-70 Rediset	45
Figura 13 - Volume de Vazios, Volume do Agregado Mineral e Relação Betume Vazios CAP 50-70 Convencional / CAP 50-70 Rediset	46
Figura 14 - Densidade Aparente e Vazios Cheio de Betume CAP 50-70 Convencional / CAP 50-70 Rediset.....	47
Figura 15 - Localização da Pedreira Vogelsanger	48
Figura 16 - Peneirador Granulométrico e Balança	49
Figura 17 - Equipamento para Ensaio de Abrasão Los Angeles	50
Figura 18 - Exemplo de Picnômetro	51
Figura 19 - Amostra dentro do vácuo	52
Figura 20 - Medição para ensaio de Índice de Forma.....	54
Figura 21 - Amostra sendo posta em solução.....	55
Figura 22 - Material retirado da solução.....	55
Figura 23 - Ilustração da curva granulométrica dentro da Faixa C DNIT	57
Figura 24 - Picnômetros com CAP 7-10 para ensaio de Massa Específica.....	58
Figura 25 - Ensaio de Penetração.....	59
Figura 26 - Anéis preenchidos com CAP	60

Figura 27 - Início e ponto de medição do ensaio de Ponto de Amolecimento	60
Figura 28 - Equipamentos de Viscosidade.....	61
Figura 29 - Tentativa de caracterização da viscosidade pelo Ensaio Saybolt-Furol.	62
Figura 30 - Ensaio de viscosidade Brookfield	63
Figura 31 - CAP 7-10 PPA em temperatura ambiente	64
Figura 32 - Modificação do CAP 7-10 PPA com Rediset	65
Figura 33 - Secagem dos agregados	66
Figura 34 - Mistura do agregado com o ligante.....	67
Figura 35 - Mistura asfáltica pronta para compactação	68
Figura 36 - Compactador Marshall.....	68
Figura 37 - Corpos de prova após compactação	69
Figura 38 - Desmolde dos Corpos de Prova	69
Figura 39 - Corpos de Prova CAP 7-10 PPA	70
Figura 40 - Corpo de Prova em pesagem	71
Figura 41 - Prensa Marshall utilizada.....	73
Figura 42 - Corpos de Prova em banho-maria	74
Figura 43 – Corpo de prova no molde de compressão Marshall	74
Figura 44 - Corpo de Prova no ensaio de Estabilidade Marshall	75
Figura 45 - Exemplo de Gráfico Resultado Estabilidade Marshall	75
Figura 46 - Exemplo de Cálculo de Teor Ótimo de Betume.....	76
Figura 47 - Ilustração Ensaio RTI.....	78
Figura 48 - Frisos de carga para ensaio RTI.....	78
Figura 49 - Ensaio de Resistência a Tração Indireta	79
Figura 50 - Curva de Viscosidade CAP 7-10 PPA	85
Figura 51 - Curva de Viscosidade CAP 7-10 PPA mod. Rediset	85
Figura 52 - Gráficos de Resultados Marshall CAP 7-10 PPA	89
Figura 53 - Gráficos de Resultados Marshall CAP 7-10 PPA mod. com Rediset	90
Figura 54 - Comparativo CAP 50-70 / CAP 7-10 PPA	94
Figura 55 - Comparativo CAP 50-70 mod. Rediset / CAP 7-10 PPA mod. Rediset	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio para agregados	20
Tabela 2 - Nova especificação brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) ..	24
Tabela 3 - Requisitos de Dosagem DNIT	37
Tabela 4 – Peso total necessários para os CP's	50
Tabela 5 - Porcentagem passante da curva granulométrica escolhida	56
Tabela 6 - Limites de Volume de Vazios e Relação Betume Vazios segundo DNIT	77
Tabela 7 - Resultados do ensaio Abrasão Los Angeles	80
Tabela 8 - Resultados Ensaio Densidade Real	81
Tabela 9 - Resultados Ensaio Índice de Forma	81
Tabela 10 - Resultados Ensaio Durabilidade	81
Tabela 11 - Resumo dos Resultados de Caracterização dos Agregados	82
Tabela 12 - Resultados Ensaio Massa Específica	83
Tabela 13 - Resultados Ensaio Penetração	83
Tabela 14 - Resultados Ensaio Ponto de Amolecimento	84
Tabela 15 - Resultados Ensaio de Viscosidade Brookfield	85
Tabela 16 - Temperaturas de trabalho dos ligantes	86
Tabela 17 - Resumo dos Resultados de Caracterização dos Ligantes	87
Tabela 18 - Parâmetros Volumétricos dos CP's com CAP 7-10 PPA	88
Tabela 19 - Parâmetros Volumétricos dos CP's com CAP 7-10 PPA mod. com Rediset	88
Tabela 20 - Resultados Ensaio de Resistência a Tração Indireta (RTI)	93
Tabela 21 - Comparativo RTI misturas com Rediset	96

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	15
1.3	PROCEDIMENTOS PARA O ALCANCE DO OBJETIVO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
2.2	AGREGADOS.....	19
2.2.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	19
2.2.2	ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	20
2.2.3	GRANULOMETRIA E CURVA GRANULOMÉTRICA	21
2.3	LIGANTE ASFÁLTICO.....	23
2.3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	23
2.3.2	ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS.....	24
2.3.3	TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO EM MISTURAS	25
2.4	MISTURAS ASFÁLTICAS.....	25
2.4.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	25
2.4.2	TIPOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS	26
2.4.3	MISTURAS ASFÁLTICAS QUENTES E MORNAS	28
2.5	ADITIVOS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS	29
2.5.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	29
2.5.2	ADITIVOS MODIFICADORES: ÁCIDO POLIFOSFÓRICO (PPA).....	29
2.5.3	ADITIVOS MORNOS: REDISET	31
2.6	METODOLOGIAS DE DOSAGEM	34
2.6.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	34
2.6.2	METODOLOGIA MARSHALL	35
2.6.3	METODOLOGIA SUPERPAVE.....	38
2.6.4	METODOLOGIA FRANCESA DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS.....	39
2.7	ESTUDOS PRÉVIOS.....	42
2.7.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	42

2.7.2	RESULTADOS DO CAP 50-70	42
2.7.3	RESULTADOS DO CAP 50-70 MODIFICADO COM REDISENTO	44
3	PROCEDIMENTO LABORATORIAL	48
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	48
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO.....	48
3.2.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	48
3.2.2	GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E CURVA GRANULOMÉTRICA	49
3.2.3	ENSAIO ABRASÃO LOS ANGELES	50
3.2.4	ENSAIO DE DENSIDADE REAL.....	51
3.2.5	ÍNDICE DE FORMA	53
3.2.6	ENSAIO DE DURABILIDADE	54
3.2.7	CURVA GRANULOMÉTRICA.....	56
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO	57
3.3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	57
3.3.2	ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA.....	58
3.3.3	ENSAIO DE PENETRAÇÃO	59
3.3.4	ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO	59
3.3.5	ENSAIO DE VISCOSIDADE	60
3.3.6	MODIFICAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO	63
3.4	ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	65
3.4.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	65
3.4.2	MISTURA	66
3.4.3	COMPACTAÇÃO	68
3.4.4	DESMOLDE DOS CORPOS DE PROVA	69
3.5	ENSAIOS PARA CORPOS DE PROVA MARSHALL	70
3.5.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	70
3.5.2	ENSAIOS CONVENCIONAIS DA METODOLOGIA MARSHALL	71
3.5.3	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE TRABALHO DA MISTURA.....	76
3.5.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO INDIRETA.....	77
4	RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	80
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	80
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO.....	80

4.2.1	ENSAIO DE ABRASÃO LOS ANGELES	80
4.2.2	ENSAIO DE DENSIDADE REAL.....	81
4.2.3	INDICE DE FORMA	81
4.2.4	DURABILIDADE	81
4.2.5	RESUMO.....	82
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE	82
4.3.1	ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA.....	82
4.3.2	ENSAIO DE PENETRAÇÃO	83
4.3.3	ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO	83
4.3.4	ENSAIO DE VISCOSIDADE	84
4.3.5	RESUMO.....	87
4.4	CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA	87
4.4.1	ENSAIOS CONVENCIONAIS MARSHALL	87
4.4.2	TEOR DE TRABALHO DA MISTURA	91
4.4.3	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO INDIRETA	92
4.5	COMPARATIVO DE RESULTADOS COM ESTUDOS PRÉVIOS.....	93
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dentro da indústria de asfaltos, um dos maiores atos nocivos ao meio ambiente provém da queima de combustíveis fósseis, necessários para a elevação da temperatura dos materiais envolvidos na produção da massa asfáltica (MOTTA, 2011). Esta queima exala gases tóxicos à atmosfera, causando o comumente chamado efeito estufa.

A utilização imprudente de recursos naturais, bem como a insciência dos efeitos que algumas reações químicas podem causar ao meio ambiente, se tornaram atitudes condenáveis na sociedade onde vivemos. Baseada nesta ideia, nas últimas décadas, a indústria mundial vem tendendo a uma postura mais ambientalmente sustentável.

Segundo Prowell e Hurley (2007, p. 5, tradução do autor), *“a indústria de pavimento asfáltico tem provado ser líder, não apenas na implementação de tecnologias exigidas pelo Governo, mas também na busca de inovações para promover um planeta mais limpo e melhores condições de trabalho para os funcionários”*.

Nesta época, a indústria de pavimentos flexíveis já adotava aditivos de várias naturezas com intuito de melhorar certas características das misturas. Logo, seguindo a tendência mundial, a utilização dos aditivos passou a mirar um novo problema: a poluição ocasionada pela produção de asfalto.

Dentre testes e pesquisas, os aditivos para misturas asfálticas mornas começaram a ganhar destaque. Estes aditivos modificam a massa asfáltica, diminuindo a temperatura exigida para a mistura dos materiais, encurtando automaticamente a quantidade de combustíveis fósseis necessários para esta atividade e reduzindo o consumo energético (PROWELL E HURLEY, 2007).

Inúmeras modificações por aditivos, não apenas para misturas asfálticas mornas, vêm sendo testadas todos os dias. Enrijecimento, maleabilidade, trabalhabilidade e resistência a gradientes térmicos extremos, são algumas das numerosas vantagens que os aditivos possibilitam quando utilizados como modificadores de CAP.

O uso de aditivos também é aspirado como alternativa mais econômica em relação a ligantes de elevada consistência, utilizados para tráfegos pesados e considerados caros pela indústria. A utilização do Ácido Polifosfórico (PPA), analisada neste estudo, por exemplo, pretende aumentar a rigidez de um CAP 50-70 tornando-o mais consistente, como um CAP 10-20 ou CAP 7-10, utilizados para rodovias de tráfego intenso de cargas pesadas, extremamente fatigantes para o asfalto.

Tornou-se, portanto, crucial a análise mecânica, reológica e química destas misturas, para garantir um máximo desempenho à finalidade da massa asfáltica e sua aplicação como solução para pavimentação. Com estes estudos em foco, a modificação de CAP por aditivos vêm se tornando gradativamente comum, no ramo de pavimentos (MOTTA, 2011).

Fundamentado na tendência industrial, na procura de soluções sustentáveis e econômicas e, com objetivo de analisar e comparar o comportamento entre o CAP convencionalmente mais utilizado no Brasil e modificações provindas do mesmo, este trabalho se justifica pela busca de melhorias de desempenho e de propriedades das misturas asfálticas, em adição a redução de sua temperatura no processo de usinagem, para maior otimização e sustentabilidade, no ramo da indústria de pavimentos flexíveis.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo a análise de misturas asfálticas, baseado na Metodologia Marshall, com Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50-70 convencional e suas modificações com dois tipos de aditivos: O Ácido Polifosfórico (PPA) e o Rediset.

1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Para o alcance do objetivo geral deste estudo, é preciso:

- Obter e caracterizar os agregados e o ligante asfáltico, bem como suas modificações;
- Estudar o método de dosagem e análise dos ensaios, incluindo sua normatização;

- Elaborar corpos de prova de acordo com a Metodologia Marshall, para obtenção do teor ótimo de trabalho da mistura asfáltica;
- Produzir corpos de prova com o teor ótimo encontrado para realização do ensaio de Resistência a Tração Indireta;
- Correlacionar os resultados obtidos nos ensaios com os resultados de estudos anteriores com o mesmo ligante asfáltico, a fim de verificar se as modificações estudadas por este trabalho levam a alguma melhora significativa na mistura em questão.

1.3 PROCEDIMENTOS PARA O ALCANCE DO OBJETIVO

Para o desenvolvimento dos estudos laboratoriais e a análise mecânica e reológica das misturas asfálticas foram produzidos dois tipos de misturas asfálticas. Uma com CAP 50-70 modificado com Ácido Polifosfórico e outra com CAP 50-70 modificado com Ácido Polifosfórico e Rediset.

A curva granulométrica, utilizada nas misturas, foi gerada a partir da fórmula de Fuller-Talbot, utilizada inicialmente na pesquisa de Barra (2005) e Guerrero (2013), devido ao fato de se relacionar a uma curva granulométrica bem definida e contínua. A mesma corresponde a uma curva densa, condizente aos limites sugeridos pelo DNIT, em sua faixa granulométrica de trabalho C (DNIT-ES 031/2006).

O material granulométrico, fornecido pela empresa de britagem Vogelsanger, foi ensaiado e caracterizado pelo estudante Rodrigo Siroma com o auxílio e análise do autor.

Já o ligante asfáltico CAP 50-70 foi fornecido já modificado com Ácido Polifosfórico pela empresa CBB Asfaltos. A modificação do mesmo com o aditivo Rediset e os ensaios de caracterização do ligante foram executados e analisados pelo autor.

O material granulométrico foi caracterizado pelos seguintes ensaios:

- Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98);
- Índice de Forma (DNER-ME086/94);
- Durabilidade (DNER-ME 089/94);
- Massa Específica Real ou Densidade Real (DNER-ME 084/95).

E o ligante asfáltico foi caracterizado pelos ensaios a seguir:

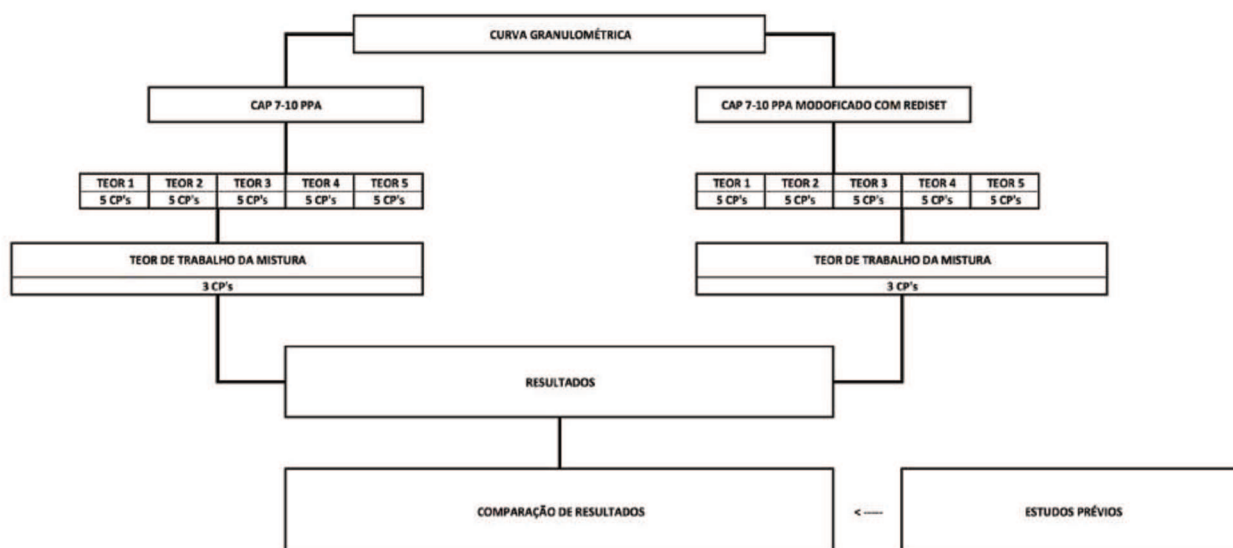
- Penetração (ABNT NBR 6576);
- Ponto de Amolecimento (ABNT NBR 6560);
- Viscosidade Brookfield (ABNT NBR 9393);
- Massa Específica Real ou Densidade Real (ABNT NBR 6296).

A metodologia de formulação utilizada foi a Metodologia Marshall. Este método permitiu estabelecer um teor de ligante de trabalho para ambas as misturas.

Posteriormente, mais três corpos de prova para cada mistura foram elaborados com os teores ótimos de trabalho, sendo, enfim, ensaiados com o ensaio de Resistência a Tração Indireta (RTI) (ABNT NBR 7222).

Finalmente, os resultados das amostras foram comparados com os publicados por estudos feitos pelos estudantes Pedro Zagolin e Jéssica Lemke Gumiel, em seus Trabalhos de Conclusão de Curso. A esquematização do procedimento para o alcance do objetivo deste estudo está representada na Figura 1, abaixo.

Figura 1 - Procedimento para o alcance do objetivo



Fonte: AUTOR

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

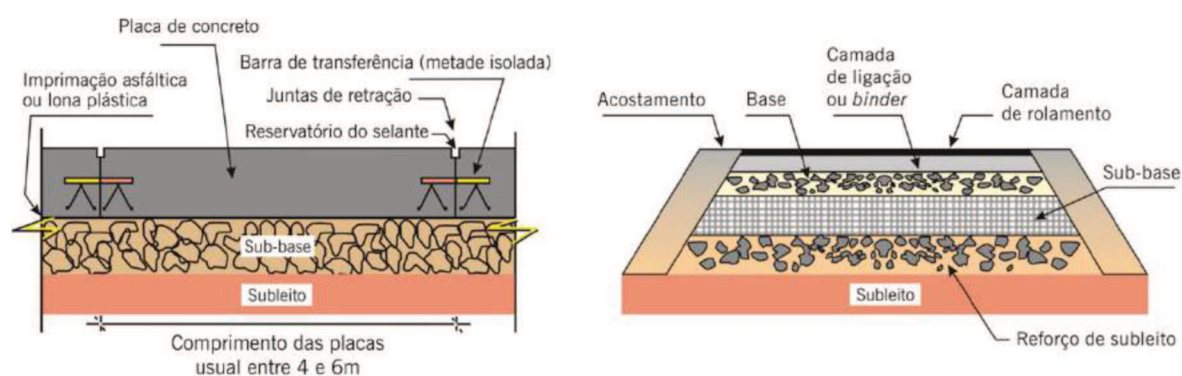
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conceitualmente, “pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 9).

Os pavimentos são classificados comumente como rígidos, flexíveis e intertravados, possuindo características específicas e materiais fundamentais distintos para cada um. Os pavimentos rígidos utilizam o cimento Portland, enquanto os pavimentos flexíveis fazem uso do cimento asfáltico, para a união de seus agregados. Já os pavimentos intertravados são, geralmente, construídos através do travamento entre blocos de concreto Portland e utilizados para vias de tráfego leve.

Bernucci *et al.* (2008) ainda citam que, além desta diferença básica na constituição do pavimento, as classificações ainda consideram o comportamento reológico dos mesmos. Enquanto o pavimento rígido tende a absorver praticamente todas as forças que agem sobre sua superfície, o pavimento flexível absorve gradualmente estas ações, dependendo seriamente de suas camadas inferiores. A Figura 2 ilustra seções transversais de ambas as classes de pavimento.

Figura 2 - Diferença entre tipos de pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

Prowell e Hurley (2007) citam que os pavimentos são constituídos pela associação de agregados com cimento. Especificamente, os revestimentos asfálticos, como já citado, empregam o cimento asfáltico para unir estes agregados. Porém, a adição de alguns outros materiais, com o intuito de alterar e/ou melhorar certas propriedades dos concretos asfálticos, é cada vez mais empregada na indústria.

Alguns aditivos permitem um maior enrijecimento do cimento asfáltico, outros buscam melhorar sua trabalhabilidade em temperaturas baixas, preservando as características convencionais da mistura. Muitos aditivos são testados todos os dias pelas indústrias químicas, oferecendo muitas possibilidades de modificações e soluções para este ramo da engenharia. É importante ressaltar, no entanto, que qualquer modificação feita, tanto no processo fabril, quanto em algum de seus componentes, deve ser analisada detalhadamente, para evitar alterações caóticas no comportamento mecânico e/ou reológico da mistura (PROWELL E HURLEY, 2007).

2.2 AGREGADOS

2.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Todos os revestimentos asfálticos são constituídos de associações de ligantes asfálticos, de agregados e, em alguns casos, de produtos complementares, também chamados de aditivos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

É possível encontrar na literaturas diversas definições para os agregados. De acordo com a norma ABNT NBR 9935/2011, que determina a terminologia dos agregados, o termo agregado é definido como *“material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto”*.

Os agregados, também chamados de granulares, são de extrema importância para a qualidade das misturas asfálticas. Seu comportamento reológico depende, desde como o intemperismo agiu sobre o mesmo, até os minerais que o compõem.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), estes agregados podem ser de natureza natural, artificial ou reciclado:

- Natural: São agregados encontrados na natureza, de diferentes tipos de rocha e teores de minerais;

- Artificial: São resíduos de processos industriais, tais como escória de alto-forno e aciaria, ou fabricados especificamente para alto desempenho, como algumas argilas;
- Reciclado: São os agregados provenientes de reuso de materiais diversos.

Cada tipo e natureza de agregado atua de forma distinta, quando misturado com o cimento asfáltico e seus aditivos. Por este motivo, é de extrema importância a caracterização dos granulares, por meio de ensaios padronizados.

2.2.2 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Bernucci *et al.* (2008, p. 115) citam que “o agregado escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades, de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. Esta escolha é feita em laboratório, onde uma série de ensaios é utilizada para a predição do seu comportamento posterior, quando em serviço”.

Alguns destes ensaios são apresentados segundo a Tabela 1, especificando, também, as normas brasileiras que os gerem.

Tabela 1 - Ensaio para agregados

Ensaio	Descrição	Norma
Granulometria por Peneiramento	Fixa o procedimento para a análise granulométrica de agregados miúdos e graúdos, por peneiramento.	DNER-ME 083/98
Abrasão Los Angeles	Prescreve o método para determinação da abrasão "Los Angeles" de agregados.	DNER-ME 035/98
Durabilidade ou Sanidade	Fixa o modo pelo qual se determina a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio ou de magnésio.	DNER-ME 089/94
Adesividade	Fixa o modo pelo qual se verifica a adesividade de agregado graúdo o ligante betuminoso.	DNER-ME 078/94

Índice de Forma	Estabelece o método para determinação do índice de forma de agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm, pelo método do paquímetro.	NBR 7809/2006
Teor de Impureza Orgânica	Fixa o procedimento para a estimativa, pela colorimetria, da presença de compostos orgânicos nocivos em areias para argamassa e concreto de cimento.	DNER-ME 055/95
Resistência ao Esmagamento	Fixa o modo para a determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos, de grãos compreendidos entre 9,5 mm e 12,5 mm.	DNER-ME 197/97
Massa Específica do Agregado Graúdo	Prescreve os métodos para a determinação da absorção e da massa específica nas condições seca e saturada superfície seca de agregado graúdo, natural ou artificial, para aplicação nos estudos de dosagem e produção de concreto.	DNER-ME 195/97
Massa Específica Solta Seca do Agregado Graúdo	Prescreve o método para a determinação da massa unitária de agregado em estado solto.	DNER-ME 152/95
Equivalente de Areia	Fixa os requisitos para a determinação do equivalente de areia de solos ou de agregados miúdos.	DNER-ME 054/97

Fonte: AUTOR

2.2.3 GRANULOMETRIA E CURVA GRANULOMÉTRICA

A granulometria do agregado é um dos principais fatores que influenciam no comportamento de uma mistura asfáltica. Quanto mais bem graduada é a curva, melhor é o preenchimento dos vazios do revestimento, quando compactado devidamente (PROWELL E HURLEY, 2007).

Esta distribuição granulométrica está tão atrelada ao desempenho do revestimento, que intervém em várias propriedades importantes como: rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à

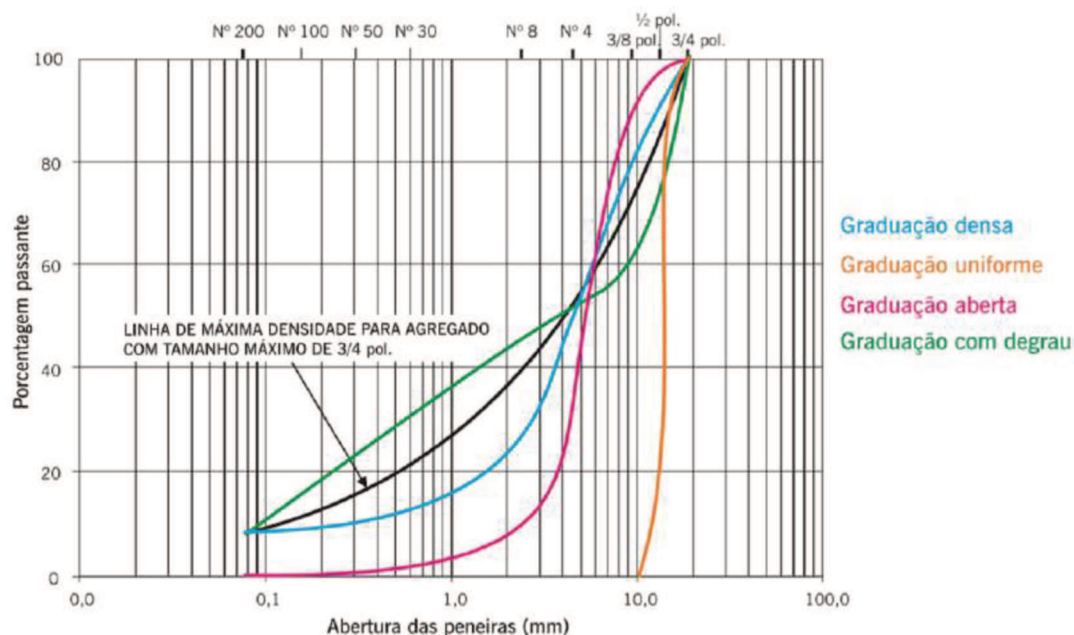
deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc. (Bernucci *et al.*, 2008).

O controle da granulometria empregada na mistura asfáltica provém do peneiramento do granular. Sua composição é feita laboratorialmente por várias peneiras. Estas, são especificadas conforme o tamanho médio passante nas respectivas faixas granulométricas (DNIT 031/2006):

- Agregados Graúdos: agregados retidos até a peneira nº 10. Conhecidos como brita, cascalho ou seixo;
- Agregados Miúdos: agregados passantes na peneira nº 10 e retidos até a peneira nº 200. Conhecidos como pó de pedra e/ou pó de brita;
- Material de Enchimento: Também conhecido como “filler”, é o material passante em no mínimo 65% de seu total na peneira nº 200. Chamado de cal, cimento Portland, pó de brita e/ou pó de chaminé.

A união destas granulometrias e seus pesos, formam uma Curva Granulométrica. Esta curva nada mais é que um gráfico que ilustra a porcentagem passante do agregado na peneira em razão da abertura (em milímetros) das mesmas. A Figura 3 mostra os diversos tipos de graduação para uma curva granulométrica.

Figura 3 - Tipos de curvas granulométricas



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008), p. 123.

Dentro desta ilustração é possível perceber quatro tipos de graduação (Bernucci *et al.*, 2008):

- Densa: uma curva granulométrica com graduação densa ou bem-graduada é aquela que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à de densidade máxima;
- Uniforme: uma curva granulométrica uniforme é aquela que apresenta a maioria de suas partículas com tamanhos em uma faixa bastante estreita, com característica íngreme;
- Aberta: uma curva granulométrica aberta é aquela que apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência do material de enchimento para preencher os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de vazios;
- Degrau: uma curva granulométrica com degrau, também conhecida como descontínua, é aquela que apresenta uma pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários (miúdos), formando um patamar na curva granulométrica correspondente a estas frações.

2.3 LIGANTE ASFÁLTICO

2.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Desde a agricultura até a pavimentação, o ligante asfáltico vem sendo utilizado pelo homem há muitos anos, sendo conhecido como um dos instrumentos de construção mais antigos e versáteis. Entre todos, o uso deste material na construção de pavimentos é um dos usos mais importantes e mais utilizados mundialmente. No Brasil, cerca de 95% dos pavimentos são feitos com revestimento asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Bernucci *et al.* (2008) p. 25, ainda citam que, por definição, *“o ligante asfáltico é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção”*.

Também conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP), o ligante asfáltico é proveniente da destilação do petróleo e possui a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável a água e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um

processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água, porém, o torna um material muito utilizável para fins de pavimentação (BERNUCCI *et al.*, 2008; PROWELL E HURLEY, 2007).

2.3.2 ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Para que o ligante asfáltico fosse utilizado de forma adequada e padronizada, alguns ensaios e propriedades foram normatizados.

Em julho de 2005 foi aprovada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) uma nova especificação de CAP para todo o Brasil (BERNUCCI *et al.*, 2008). Essa nova especificação é baseada no ensaio de penetração, que avalia a dureza do ligante e nos ensaios que serão citados na Tabela 2, assim como as normas brasileiras que os gerem.

Tabela 2 - Nova especificação brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín. a 150°C, mín. a 177°C	S	192 90 40 a 150	141 50 30 a 150	110 43 15 a 60	80 36 15 a 60	NBR 14950	E 102
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín. a 150°C, mín. a 177°C, SP 21 Índice de Suscetibilidade Térmica	cP	374 203 76 a 285 (-1,5) a (+0,7)	274 112 57 a 285 (-1,5) a (+0,7)	214 97 28 a 114 (-1,5) a (+0,7)	155 81 28 a 114 (-1,5) a (+0,7)	NBR 15184 -	D 4402 -
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Sulobibilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos							
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5	-	D 2872
Dutibilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 46
Penetração retida, mín. (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

(*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração original.

Fonte: ANP (2005)

O CAP 7-10 PPA, abordado neste estudo, não se encontra na especificação brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo por se tratar de um ligante modificado e, ainda, raramente utilizado na indústria brasileira. Nota-se, também, que embora a utilização de CAP's de elevada consistência, como o CAP 30-45 e o CAP 10-20, esteja se tornando cada vez mais necessária devido ao tráfego intenso imposto às rodovias, a especificação brasileira também não traz limites normativos para este último.

2.3.3 TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO EM MISTURAS

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o teor de ligante ou teor de projeto da mistura, como também é conhecido, é a porcentagem de ligante em relação a curva granulométrica dos agregados. Este teor varia de acordo com o método de dosagem (Metodologia Francesa, Metodologia Superpave, Metodologia Marshall, entre outros) e/ou da formulação a ser utilizada, levando em conta parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura e a temperatura na qual o pavimento será submetido. A metodologia de dosagem a ser utilizado neste trabalho é, também, o método mais utilizado no Brasil, denominado Metodologia Marshall (DNER-ME 43/95), que será apresentado posteriormente.

Uma dosagem a partir de um teor de projeto da mistura asfáltica pode ser dada a partir de dois tipos de teores de ligante: o teor de ligante interno e teor de ligante externo.

O teor de ligante interno é dado como 100% do peso do corpo de prova a própria mistura asfáltica como um todo (massa dos granulares e massa do ligante asfáltico). Já o teor de ligante externo é dado como estes 100% apenas a matriz granular, ou seja, o ligante asfáltico é adicionado a este peso final dos agregados, não alterando assim, a curva granulométrica e a composição do esqueleto granular (GUERRERO, 2013).

2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS

2.4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A mistura asfáltica é uma *“mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os*

requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 157).

Este tipo de revestimento pode ser fabricado de duas maneiras: em usinas específicas, sejam elas fixas ou móveis; ou na própria pista. Estes revestimentos também se identificam ao tipo de ligante:

- Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP): quando a mistura é amalgamada à quente;
- Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP): quando misturada à frio;
- Asfalto Diluído de Petróleo (ADP): Comumente utilizado na etapa intermediária da pavimentação, conhecida como imprimação.

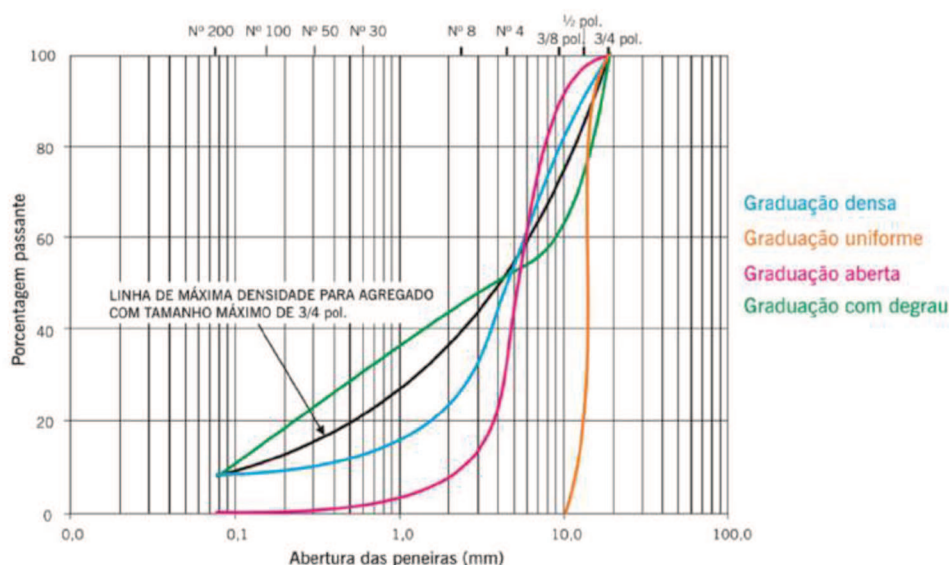
Existem outros tipos de mistura quando a recomposição asfáltica é abordada, como micro revestimentos e lama-asfáltica, sendo misturas novas relativamente fluidas e misturas recicladas, provenientes de fresadoras-recicladoras (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.4.2 TIPOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

De acordo com Motta (2011), os diferentes tipos de misturas asfálticas podem ser classificados de acordo com parâmetros como: granulometria dos agregados, temperaturas ou modificações.

A classificação por granulometria dos agregados se dá por quatro grupos: densa ou bem graduada, aberta ou descontínua, também conhecida como degrau (Figura 4). A descrição de cada um dos grupos é apresentada junto ao subitem 2.2.3, quando o conceito de Curva Granulométrica é explicado.

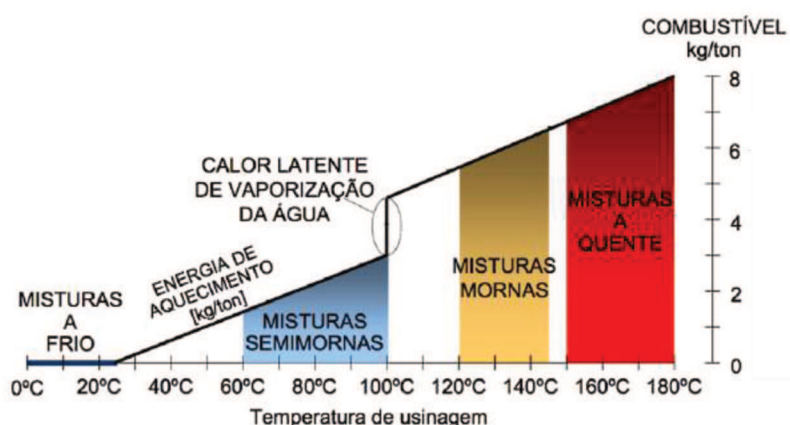
Figura 4 - Classificação de misturas por granulometria



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008), p. 123.

O segundo tipo de classificação, por temperatura, se divide basicamente em: misturas a quente, misturas mornas, misturas semi-mornas e misturas a frio. A Figura 5 apresenta a classificação das misturas asfálticas por temperatura e quantidade de combustível fóssil utilizado em quilogramas por tonelada de massa asfáltica produzida.

Figura 5 - Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (números aproximados)



Fonte: OLARD, 2008 e D'ANGELO *et al.*, 2008 apud MOTTA, 2011, p. 46

As misturas a quente são fabricadas a partir do aquecimento dos agregados pétreos e do ligante asfáltico. Sua usinagem é feita com temperaturas entre 150° e 200° C (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

Misturas asfálticas mornas e semi-mornas, como o nome já sugere, são fabricadas a partir de uma temperatura intermediária entre as misturas a quente e misturas a frio. Prowell e Hurley (2007) mencionam que a diferença entre as misturas semi-mornas e mornas está na sua temperatura final após a usinagem, onde abaixo de 100°C (temperatura de vaporização da água) a mistura é considerada semi-morna e acima, é dita morna.

Por fim, as misturas asfálticas frias são moldadas sob temperatura ambiente por reações químicas (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

O terceiro tipo de classificação se dá a partir do tipo de modificação aplicado para a mistura asfáltica. Hoje em dia, na indústria, ainda é comum a utilização das misturas asfálticas a quente, ou como é mais comum, CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente). Isso ocorre devido a suas propriedades, praticidade e viabilidade (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

2.4.3 MISTURAS ASFÁLTICAS QUENTES E MORNAS

As misturas asfálticas convencionais ou quentes são o tipo mais utilizado nos serviços de pavimentação, podendo ser fabricadas com diversos tipos de granulometria e de asfaltos para diferentes níveis de tráfego, garantindo uma boa resistência e durabilidade (MOTTA, 2011).

As misturas a quente necessitam ser elevadas a uma faixa de temperatura entre 150° e 200° C (ASPHALT INSTITUTE, 2007). Este processo de aquecimento tanto do ligante quanto dos granulares consome energia e, geralmente, esta energia provém da queima de grandes quantidades de combustíveis fósseis (CO₂ e NO_x), gerando um custo significativo no processo de usinagem (GUERRERO, 2013).

As misturas asfálticas mornas têm como um de seus principais objetivos justamente promover a diminuição destas temperaturas de trabalho, reduzindo os custos de fabricação sem comprometer a qualidade referente ao comportamento mecânico e reológico do concreto asfáltico, mantendo suas propriedades em patamares aceitáveis (GUERRERO, 2013).

Seguindo esta tendência, o conceito de misturas asfálticas mornas é bem visto pela indústria mundial como solução para a grande queima de combustíveis durante a fabricação do asfalto.

2.5 ADITIVOS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS

2.5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Um dos principais mecanismos de ruptura do revestimento asfáltico consiste no acúmulo de deformações plásticas, também chamadas de permanentes. Estas deformações podem ser combatidas de diversas maneiras. Uma delas é o uso de aditivos, modificando o ligante asfáltico base da mistura, fazendo com que as resistências contra estes tipos de deformações sejam ainda maiores (DOMINGOS E FAXINA, 2015).

O uso de aditivos modificadores das propriedades do asfalto vem sendo cada vez mais estudado e utilizado nos últimos anos devido ao crescente volume de veículos comerciais e peso por eixo. Este volume de tráfego crescente produz solicitações mecânicas cada vez maiores para o revestimento asfáltico, solicitações, estas, que asfaltos convencionais e de pouca rigidez não conseguem suportar plenamente (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Seguindo este raciocínio, este estudo aborda misturas asfálticas modificadas com dois aditivos, o Ácido Polifosfórico, aditivo utilizado para aumentar significativamente a consistências de CAP's de pouca rigidez; e o Rediset, aditivo que busca proporcionar uma trabalhabilidade melhor ao ligante, reduzindo suas temperaturas de usinagem e compactação.

2.5.2 ADITIVOS MODIFICADORES: ÁCIDO POLIFOSFÓRICO (PPA)

Os aditivos, empregados como modificadores de asfaltos, devem ser compatíveis com os ligantes e resistentes ao calor empregado nos processos de compactação e usinagem, já que as propriedades do ligante são altamente sensíveis as condições de operação, visto quando se trata do comportamento reológico, que reflete diretamente as mudanças na constituição e/ou estrutura do ligante (FERNANDES E ALENCAR, 2011).

A utilização de ácido polifosfórico (PPA) como aditivo na modificação de ligantes asfálticos é uma prática bem recente, vários estudos de sobre esse aditivo

têm mostrado que a modificação química por ácido polifosfórico apresenta melhorias nas propriedades dos ligantes, principalmente as propriedades reológicas (Masson, 2008, Masson e Collins, 2009), confirmando que é possível melhorar o desempenho dos ligantes (FERNANDES E ALENCAR, 2011).

O ÁCIDO POLIFOSFÓRICO

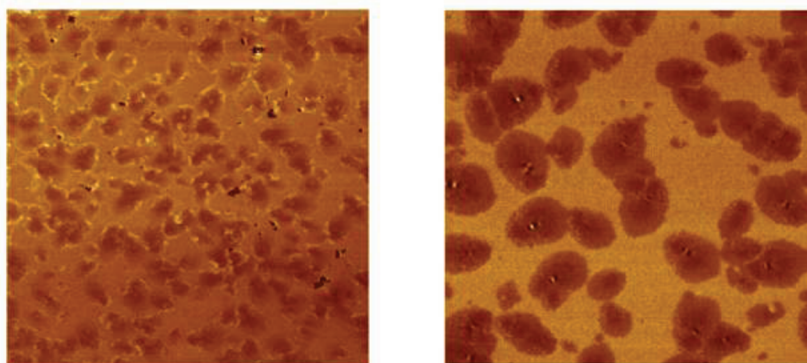
Segundo a ICL Advanced Additives (2015), o Ácido Polifosfórico (PPA) é um modificador que comprovadamente melhora as propriedades do asfalto. É usado como um modificador independente ou combinado a vários polímeros.

Especificamente, o PPA é um oligômero produzido por meio da condensação do ácido monofosfórico ou da hidratação do pentóxido de Fósforo (P_2O_5) e é altamente solúvel em compostos orgânicos, como o CAP. O teor de PPA e os efeitos da sua adição no CAP dependem da composição química do material de base, o que está relacionado ao petróleo de origem (BAUMGARDNER, 2012).

Fernandes e Alencar (2011) enfatizam que *“o mecanismo de atuação do ácido no ligante asfáltico ainda não é bem resolvido. A literatura sugere que o ácido polifosfórico atua dispersando os asfaltenos. Tal sugestão explica o efeito mais acentuado do ácido sobre os ligantes asfálticos de natureza naftênica, devido ao fato destes ligantes apresentarem maior teor de asfaltenos.”*

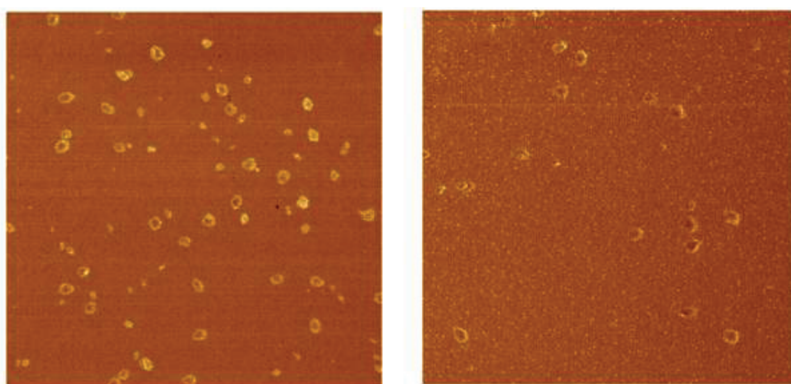
Muitos estudos sugerem a mesma atuação química do ácido no ligante. A ICL Advanced Additives (2015), afirma que a presença do PPA permite uma redução no teor de polímero da formulação, melhora a dispersão dos asfaltenos e aumenta o teor de asfaltenos aparente. Este acúmulo de asfaltenos devido a intervenção do PPA, é tão grande que, em um estudo publicado por Baumgardner (2005), a adição de 1,2% de ácido polifosfórico em massa de um ligante saudita resultou em um aumento de 62% na quantidade de asfaltenos, enquanto, em um ligante venezuelano, uma pequena adição de 0,62% de PPA na massa do ligante resultou em 42% de aumento em asfaltenos no mesmo. As imagens microscópicas de contraste do ligante Saudita e do ligante Venezuelano são ilustradas na Figura 6 e Figura 7, respectivamente.

Figura 6 - Ligante Saudita sem PPA (esquerda) e com adição de PPA (direita)



Fonte: BAUMGARDNER (2005)

Figura 7 - Ligante Venezuelano sem PPA (esquerda) e com adição de PPA (direita)



Fonte: BAUMGARDNER (2005)

Outro estudo, desta vez dirigido pela ICL Advanced Additives (2015), ainda descreve o PPA como um modificador da rigidez e viscosidade de alta temperatura dos ligantes, sem deteriorar o seu desempenho, aumentando assim, o Intervalo de Temperatura Útil (ITU) do ligante e possibilitando a fabricação de um produto superior, satisfazendo especificações que não podem ser alcançadas através do processo de refinação.

Estes estudos mostram que ainda há muito o que estudar quanto a reação do ácido polifosfórico quando utilizado como modificador para ligantes convencionais.

2.5.3 ADITIVOS MORNOS: REDISET

Cerca de 95% da massa asfáltica é composta por granulares e, embora a diminuição da temperatura dos agregados seja suficiente para a redução da temperatura de usinagem, o armazenamento do ligante em temperaturas mais baixas pode contribuir para um menor envelhecimento e/ou enrijecimento do mesmo

(MOTTA, 2011). A redução da temperatura de usinagem apenas pela temperatura dos granulares ainda pode causar uma má aderência do ligante a superfície do agregado, comprometendo o comportamento esperado pela mistura. Logo, para reduzir as temperaturas de trabalho adequadamente, a utilização de aditivos que melhoram a trabalhabilidade do ligante em temperaturas mais baixas é recomendada.

A produção de uma mistura asfáltica morna e semi-mornas pode ser de duas maneiras: espumejo do asfalto e/ou introdução de aditivos orgânicos ou surfactantes durante a fabricação, seja essa diretamente no ligante ou na mistura asfáltica (MOTTA, 2011).

O processo de espumejo do asfalto ou espumar o asfalto se dá pela introdução de água, seja com injeção direta, por agregado úmido ou ainda na forma de material hidrofílico, durante o processo de mistura a quente. Neste método, o contato da água em temperatura ambiente faz com que o asfalto quente se expanda em torno de 67% a mais do que seu volume inicial. Esta expansão resulta em uma redução da viscosidade da mistura (PROWELL E HURLEY, 2007).

Já o processo por introdução de aditivos a mistura ou ao ligante propriamente dito é separado por dois grandes grupos de aditivos: os orgânicos e os surfactantes.

O processo de mistura de ambos os grupos é basicamente o mesmo: a inclusão do aditivo previamente no ligante ou durante o processo de usinagem. Segundo Ruhl (2008), este tipo de aditivo possibilita uma redução de temperatura da mistura em cerca de 30° C a 40° C.

Ao serem submetidos a uma temperatura maior que seu ponto de amolecimento, os aditivos orgânicos modificam algumas propriedades do ligante, reduzindo sua viscosidade. Esta pode ser a maior diferença entre os aditivos orgânicos e os surfactantes (MOTTA, 2011).

Enquanto os aditivos orgânicos interferem na viscosidade do ligante, os aditivos surfactantes, também conhecidos como melhoradores de adesividade, agem na interface agregado/ligante, assistindo no processo de recobrimento, sem qualquer interferência nas propriedades de consistência do asfalto, medidas em ensaio de viscosidade, penetração e ponto de amolecimento (PROWELL E HURLEY, 2007).

Motta (2011), cita exemplos de aditivos como Asphaltan B®, CCBIT 113AD, Licomont BS 100® e Sasobit® para aditivos orgânicos, e Rediset TM WMX, Cecabase RT®, Evotherm, entre outros para aditivos surfactantes.

O REDISET

O Rediset é um aditivo para misturas asfálticas mornas, produzido pela empresa holandesa Akzo Nobel e comercializado em forma de pequenas pastilhas (Figura 8), cujo objetivo é reduzir a temperatura de usinagem e compactação em torno de 30° C a 40° C (como citado anteriormente).

Segundo Guerrero (2013), o Rediset combina produtos químicos e orgânicos em sua composição que não produz alterações significativas na viscosidade do ligante. Porém, através de uma “adesão ativa”, esta combinação ativa a trabalhabilidade entre ligante e agregado, proporcionando um efeito antistripping (efeito ativador da adesividade do ligante ao agregado) a mistura asfáltica.

O Rediset modifica o aglutinante de asfalto de tal modo que reduz a tensão de superfície de asfalto, aumentando a trabalhabilidade da mistura e a sua capacidade de revestir a superfície total do agregado. Os componentes químicos do Rediset permitem um revestimento e compactação a temperaturas reduzidas se comparado a mesma mistura asfáltica quente. Os agentes de adesão ativa promovem uma ligação entre o ligante betuminoso e a superfície inteira do agregado, mesmo se houver humidade (PROWELL E HURLEY, 2007).

Prowell e Hurley (2007) ainda citam que o Rediset é empregado a uma taxa entre 1,5% a 2,5% em massa de ligante. Como esta porcentagem é muito pequena, o aditivo não provoca alterações significativas nas propriedades de consistência do asfalto. Além de, devido ao seu efeito antistripping (também chamado de efeito melhorador de adesividade), a utilização de outros elementos que possuam esta ação sobre o ligante, como é o caso da cal hidratada, pode ser descartada. A Figura 8 mostra o Rediset em sua forma a temperatura ambiente.

Figura 8 - Rediset em temperatura ambiente



Fonte: AUTOR

Uma das grandes vantagens do Rediset para a indústria se refere a não necessidade de alteração da planta original da usina ou do processo de usinagem convencional, já que a modificação do ligante pode ser feita durante o processo apenas com a mistura de ambos os materiais (GUERRERO, 2013).

2.6 METODOLOGIAS DE DOSAGEM

2.6.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A dosagem de uma mistura asfáltica se dá pela escolha de um teor ótimo de ligante a partir de uma curva granulométrica adotada. Seu principal objetivo é produzir uma mistura que possua uma melhor combinação de características mecânicas como estabilidade, trabalhabilidade, durabilidade, impermeabilidade, maleabilidade e resistência ao atrito (ASPHALT INSTITUTE, 2007).

O teor de projeto do ligante asfáltico pode variar de acordo com o método de dosagem utilizado. Cada método possui seus critérios e especificações. Enquanto alguns métodos possuem base científica e mecanística, como é o caso da Metodologia Francesa de Dimensionamento de Pavimentos, outro, como o método de dosagem Marshall, utiliza os muitos anos de aplicação e é considerado empírico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Guerrero (2013), cita algumas técnicas ainda utilizadas hoje em dia com cunhos empírico-mecanísticos, baseados em ensaios laboratoriais como Marshall e Índice de Suporte Califórnia (CBR), e equações que descrevem modelos de comportamento nada representativos cientificamente, expressos a partir de ábacos.

Dentre as metodologias de dosagem que se destacam no mundo atualmente, três possuem maior visibilidade e adoção. São elas: a Metodologia de Dosagem Marshall, a Metodologia Francesa de Dimensionamento de Pavimentos e a Metodologia Superpave. No Brasil, a Metodologia de Dosagem Marshall é a mais utilizada até os dias de hoje, embora já comprovada suas limitações e deficiências perante outras metodologias mais atuais e cientificamente fundamentadas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.6.2 METODOLOGIA MARSHALL

Durante a evolução dos procedimentos de dosagem, várias formas de compactação dos corpos de prova foram desenvolvidas. Dependendo da metodologia utilizada, a compactação das amostras pode ser através de impacto, amassamento, vibração ou rolagem (HARMAN *et al.*, 2002 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008).

A Metodologia de Dosagem Marshall utiliza a compactação por impacto, diferente do que ocorre normalmente em campo onde se promove a compactação por rolagem (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O método de dimensionamento Marshall tem esse nome em referencia ao engenheiro Bruce Marshall, que o desenvolveu na década de 1940. Este método, consiste basicamente em produzir no mínimo quinze corpos de prova, três para cada teor de ligante utilizado. Cada corpo de prova Marshall deve possuir 100mm de diâmetro e 63.5mm de altura, formando um cilindro. Estes corpos então são pesados e ensaiados por meio de compressão em um equipamento denominado Prensa Marshall (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Para a análise destes resultados é importante o conhecimento de alguns parâmetros (BERNUCCI *et al.*, 2008):

- Densidade aparente da mistura: densidade da mistura considerando os vazios com ar;

- Densidade máxima teórica da mistura (DMT): densidade da mistura sem considerar os vazios;
- Porcentagem de vazios da mistura (Vv): volume total de ar existente entre as partículas de agregado recobertos pelo ligante;
- Porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM): soma do volume ocupado pelo ar e pelo ligante do espaço intergranular de uma mistura, em relação ao volume total da mesma;
- Relação betume vazios: porcentagem do volume de vazios do agregado mineral que é preenchido com cimento asfáltico.

Após o conhecimento dos parâmetros volumétricos, os corpos de prova são submetidos a um condicionamento térmico especificado por norma e, então, à compressão. Este ensaio fornece dados quanto a força necessária para sua ruptura, em quilograma-força (estabilidade), e o deslocamento do raio apresentado até este ponto, em milímetros (fluência). Antes de utilizados, os valores de força obtidos para estabilidade são minimamente corrigidos, devido a pequena diferença de altura gerada pela produção dos corpos de prova (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Proveniente dos parâmetros volumétricos e dos dados coletados, um teor de ligante de projeto pode ser estabelecido. A metodologia Marshall não prevê uma única maneira de se encontrar este teor. Dentre várias maneiras, abaixo, são citadas as comumente utilizadas no país (BERNUCCI *et al.*, 2008):

- O teor de projeto é o mesmo correspondente a um volume de vazios de 4%, manifestado pela linha de tendência no gráfico referente ao parâmetro com mesmo nome;
- O teor de projeto é dado a partir da média de três teores, correspondentes aos teores associados à máxima estabilidade, à massa específica aparente máxima e a um volume de vazios de 4%;
- O teor de projeto é dado pela média da intersecção das linhas de tendência do volume de vazios e da relação betume/vazios com os limites mínimos respectivos destes parâmetros;
- O teor de projeto pode, ainda, ser dado por uma análise detalhada de todos os parâmetros e ensaios utilizados pela metodologia Marshall.

O órgão regulamentador DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte) traz alguns requisitos de dosagem de concreto asfáltico para seus

diferentes tipos de aplicação: camada de rolamento ou camada de ligação, também conhecida como binder. A Tabela 3 mostra os requisitos e métodos de ensaio para cada característica.

Tabela 3 - Requisitos de Dosagem DNIT

Características	Método de Ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de Vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 - 82	65 - 72
Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, Mpa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Fonte: DNIT ES 031 (2004)

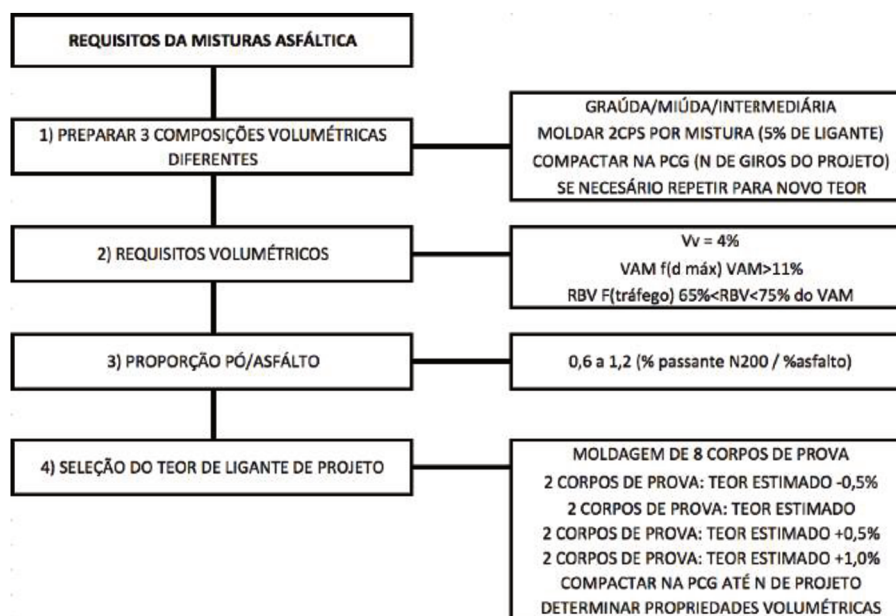
Além dos requisitos da Tabela 3 devidamente atingidos, o teor ótimo de trabalho deve apresentar as melhores características entre as alcançáveis pela mistura. Também deve-se levar em conta os aspectos observados durante a produção da mistura, como, por exemplo, sua trabalhabilidade quando se refere a facilidade em que o ligante betuminoso envolve o agregado (GUMIEL, 2015). É importante salientar que, em estudos realizados na Universidade Federal de Santa Catarina com misturas asfálticas, se pode concluir que os teores tidos como de projeto baseados na metodologia Marshall tendem a ser superiores aos valores necessários para mistura. Isto ocorre em função do empirismo imposto pelo método Marshall e da ausência de precisão do mesmo. Durante a compactação, diversos esforços mecânicos, que não condizem com a situação real de compactação no campo, são empregados. A compactação por impacto recomendada pela metodologia Marshall gera a quebra das frações granulares em seu interior, variando os parâmetros de densidade aparente, volume de vazios, desarranjando, automaticamente, a curva granulométrica formulada (BARRA, 2005; OTTO, 2009).

2.6.3 METODOLOGIA SUPERPAVE

O método Superpave, criado em 1980 nos Estados Unidos, tem como principal diferença entre a Metodologia Marshall seu processo de compactação. Segundo Bernucci *et al.* (2008), o processo de compactação desta metodologia se dá por amassamento, e não por impacto, como ocorre na Metodologia Marshall. Neste tipo de compactação, a mistura asfáltica é esmagada por uma prensa de compactação por cisalhamento giratório (PCG).

Segundo Motta (2000), esta metodologia se dá em três níveis de projeto, cada nível dependente da importância e do tráfego da rodovia. A Figura 9 mostra um fluxograma do método Superpave de dimensionamento de pavimentos.

Figura 9 - Fluxograma do Método Superpave



Fonte: adaptado de BERNUCCI *et al.* (2008)

Inicialmente três composições granulométricas são definidas e cada uma gera dois corpos de prova que são compactados com uma PCG a um teor de betume de 5% do peso final do corpo de prova. Em seguida, os mesmos parâmetros da Metodologia Marshall são obtidos: volume de vazios, relação betume/vazios e vazios do agregado mineral. Define-se, então, a quantidade de ligante estimada para a mistura de acordo com os requisitos normativos dos parâmetros volumétricos e de maneira que a mistura atinja uma percentagem de vazios de 4% (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Em seguida, a proporção de material de enchimento (passante na peneira nº 200) e ligante asfáltico deve atender aos requisitos propostos pela metodologia que, segundo a metodologia, esta razão não deve estar fora do intervalo de 0,6 e 1,2.

Por último, a seleção do teor de ligante de projeto se dá de modo que são confeccionados corpos de prova com o teor estimado anteriormente além de outros três teores: um com -0,5% de ligante do teor estimado, outro com +0,5% de ligante do teor estimado e um último com +1,0% de ligante do teor inicialmente estimado. Após a compactação por amassamento e a definição de seus parâmetros volumétricos, o teor final de projeto será o que proporcionar a mistura um volume de vazios de 4% (BERNUCCI *et al.*, 2008).

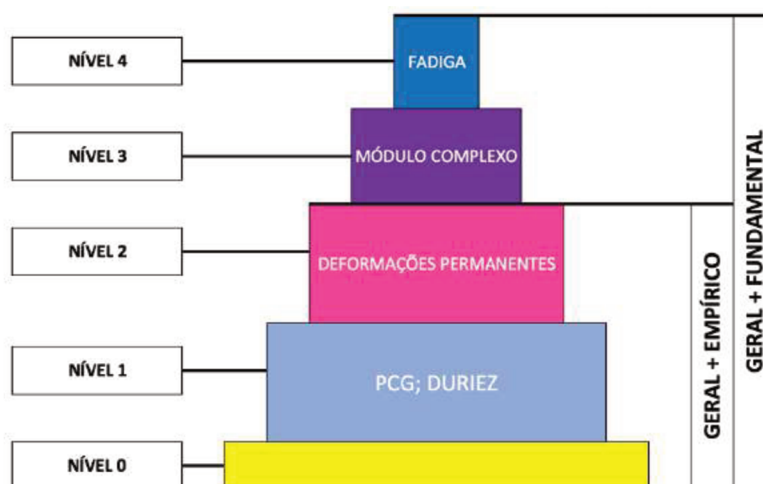
2.6.4 METODOLOGIA FRANCESA DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Pela literatura, a Metodologia Francesa é dada como a melhor e mais avançada tecnologia existente de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Segundo Barra *et al.* (2010) a metodologia francesa é dada como de caráter racional. Suas equações analíticas são a fundamentação da metodologia e, embora com aproximações, as mesmas descrevem um comportamento mecânico e reológico dos materiais utilizados em campo de forma quase perfeita, além de vir a se aperfeiçoar cada vez mais, de modo a utilizar todas as condicionantes de ação/reação do revestimento.

Guerrero (2013) cita que os procedimentos de avaliação e preparação das misturas podem ser divididos em dois conjuntos. O primeiro avalia as propriedades consideradas empíricas, em relação a parâmetros que não são utilizados para o dimensionamento do pavimento. O segundo trata dos procedimentos que avaliam as propriedades ditas fundamentais ao dimensionamento do revestimento, incorporando os princípios de funcionamento do material como realmente ocorre em campo.

Os ensaios de dosagem para a metodologia Francesa seguem uma organização de níveis, desde o Nível 0, onde ocorre a escolha dos materiais que farão parte da composição da mistura asfáltica, até o Nível 4, onde o procedimento de determinação da resistência a fadiga das misturas é feito (GUERRERO, 2013). A Figura 10 mostra os níveis de formulação de ensaios.

Figura 10 - Níveis de Formulação de Ensaio



Fonte: adaptado de MANUEL LPC (2007) *apud* GUERRERO (2013)

Nível 0

Segundo Manuel (2007) *apud* Guerrero (2013), o Nível 0 é o nível onde são realizados procedimentos que resultarão na seleção dos materiais que farão parte da mistura asfáltica a ser estudada. Desde a caracterização dos granulares, ligantes e aditivos até a definição dos teores de ligante que serão empregados nas misturas.

Nível 1

No Nível 1, ocorre o ensaio de compactação por cisalhamento giratório e o ensaio de Duriez (NF 12697-12, método B em compressão). Ensaios, estes, que avaliam a mistura asfáltica em relação a sua habilidade de compactação e resistência às ações da água, respectivamente (GUERRERO, 2013).

A compactação por cisalhamento giratório permite avaliar a trabalhabilidade da mistura no momento de sua distribuição no pavimento, além de determinar a porcentagem de vazios que deve ser alcançada em campo em função da espessura da camada e de sua posição na estrutura do pavimento. Como resultado, obtém-se a curva de densidade aparente em função da variação da altura do corpo de prova e número de giros. Já a verificação da composição ótima, determinada através da prensa de compactação por cisalhamento giratório (PCG), é confirmada quanto à sua resistência ao dano induzido pela ação da água para estimar o descolamento do ligante ao agregado pelo ensaio de Duriez (MAGALHÃES, 2004).

Nível 2

Após a mistura atingir os requisitos impostos pelos dois ensaios do Nível 1, o Nível 2 pode ser iniciado.

Segundo Guerrero (2013), o ensaio de Nível 2 é utilizado para determinar a resistência da mistura asfáltica aos afundamentos de trilho de roda. Este tipo de deformação é permanente e está diretamente ligado ao tráfego pesado de veículos, logo, o ensaio é aplicado para misturas utilizadas como camada de rolamento ou camada de ligação.

Como descrito na norma francesa, o ensaio de resistência ao afundamento de trilho de roda se dá pela passagem repetitiva de uma roda de superfície lisa, com pressão, temperatura e frequência controláveis. Este afundamento é medido em função do número de ciclos do ensaio. Seu valor máximo se dá em função da natureza e grupo de desempenho da mistura estudada. Magalhães (2004) ainda cita que este teste reproduz condições bem desfavoráveis de carregamento, com o propósito de rejeitar ou corrigir misturas que, por algum motivo, possam ter comportamentos inconstantes.

Nível 3

Guerrero (2013) descreve que, no Nível 3 é determinado o módulo complexo. Este parâmetro, embora não usualmente utilizado no Brasil, é considerado fundamental ao dimensionamento da estrutura de pavimentos.

Este ensaio combina esforços de flexão em dois pontos de corpos de prova em formato trapezoidal, sendo realizados em diferentes frequências de solicitações e temperaturas (1Hz a 30Hz e -10° C a 40° C, respectivamente). Segundo Otto (2009), estas faixas de frequência e temperatura permitem a construção de uma curva de avaliação comportamental das misturas de modo a abranger vários tipos de clima e situações.

Nível 4

Finalmente, no Nível 4, ocorre a determinação da resistência a fadiga, que também utiliza os corpos de prova trapezoidais.

Segundo Guerrero (2013), este ensaio provoca uma flexão repetida em dois pontos do corpo de prova, provocando uma deformação controlada. O ensaio termina quando a rigidez inicial do corpo de prova é reduzida a 50%, esta condição é dada

como critério de ruptura do corpo de prova. Posteriormente, uma curva de fadiga é gerada a partir de três níveis de deformação.

2.7 ESTUDOS PRÉVIOS

2.7.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Como a Metodologia Marshall tende a ser a mais utilizada no país, estudos baseados na mesma tender a ser comuns. Infelizmente, estabelecer comparativos confiáveis entre resultados de referências distintas tende a ser algo pouco prático, isso ocorre devido a utilização de materiais de diferentes origens e diversas granulometrias (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Apesar deste déficit, dois estudos elaborados no mesmo Campus da Universidade Federal de Santa Catarina possuem as características necessárias para tornar possível o comparativo entre resultados. Ambos os trabalhos tiveram como essência a mesma metodologia (Marshall), curva granulométrica e o mesmo material granular utilizado neste estudo. Além de empregarem, entre outros, o ligante primitivo do analisado neste estudo.

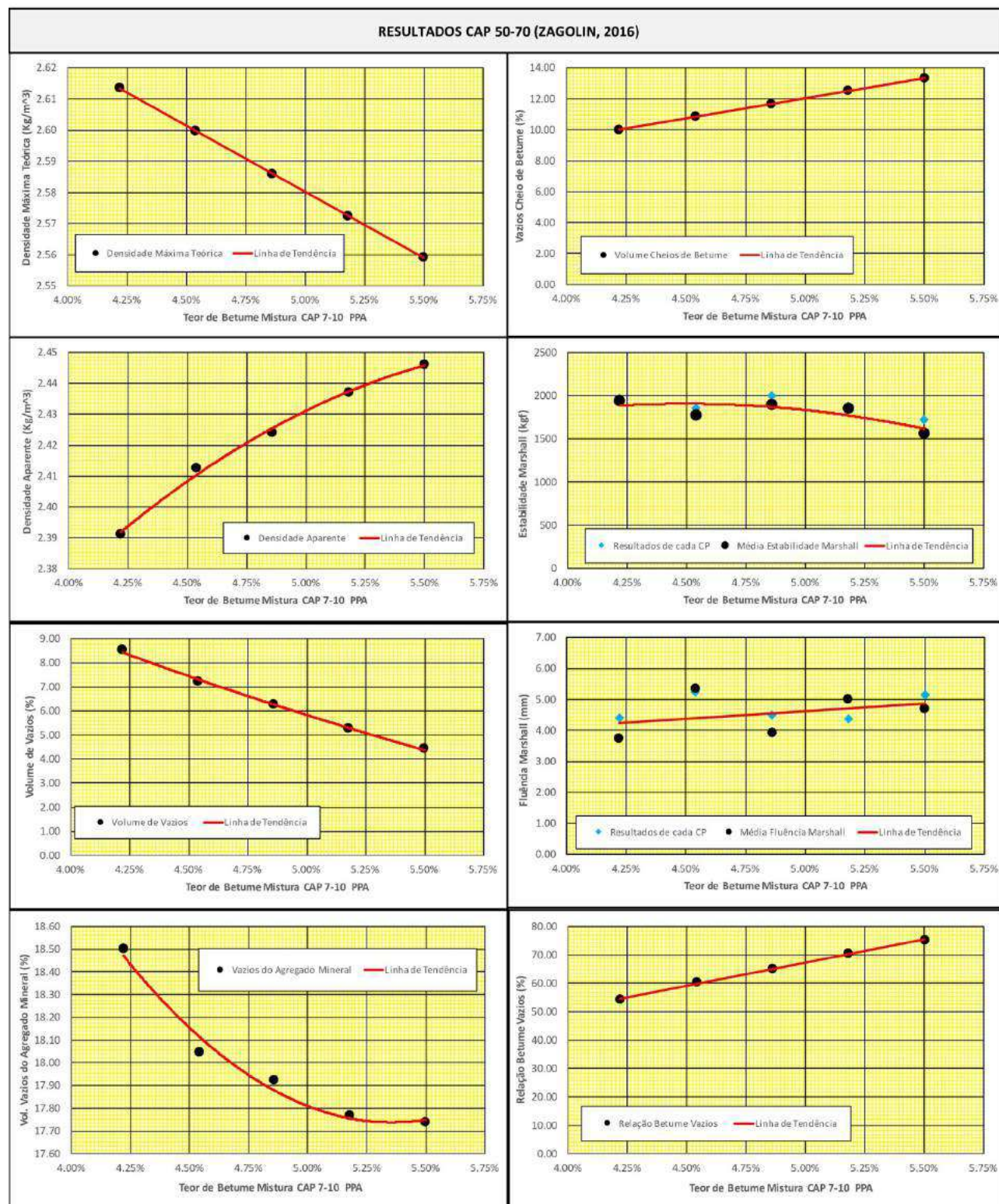
2.7.2 RESULTADOS DO CAP 50-70

Tendo como objetivo avaliar a influência do ligante betuminoso na dosagem e no comportamento mecânico de misturas asfálticas densas, o estudo de Zagolin (2016) analisa diferentes misturas asfálticas com um único diferencial entre elas, o ligante. O autor utiliza três tipos de ligantes asfálticos, o CAP 50-70, ligante primitivo do utilizado neste estudo, o CAP 30-45 e ainda um CAP 10-20, sendo este o mais denso estudado. Todas as misturas estudadas pelo autor foram feitas com a mesma curva granulométrica e metodologia de dosagem utilizadas neste trabalho, possibilitando o uso dos resultados como comparativo direto ao ligante ensaiado.

Durante os estudos de Zagolin (2016) foram obtidos parâmetros para o CAP 50-70 a partir da metodologia Marshall. Estes dados brutos provenientes de seus ensaios foram cedidos pelo autor para comparativo. Logo, não há observações e/ou conclusões alguma sobre os resultados obtidos por Zagolin (2016).

Os resultados de Zagolin (2016) relativos ao CAP 50-70 que originou o ligante modificado por ácido polifosfórico neste estudo são ilustrados na Figura 11.

Figura 11 - Resultados Marshall para mistura asfáltica com CAP 50-70 convencional



Fonte: Zagolin (2016)

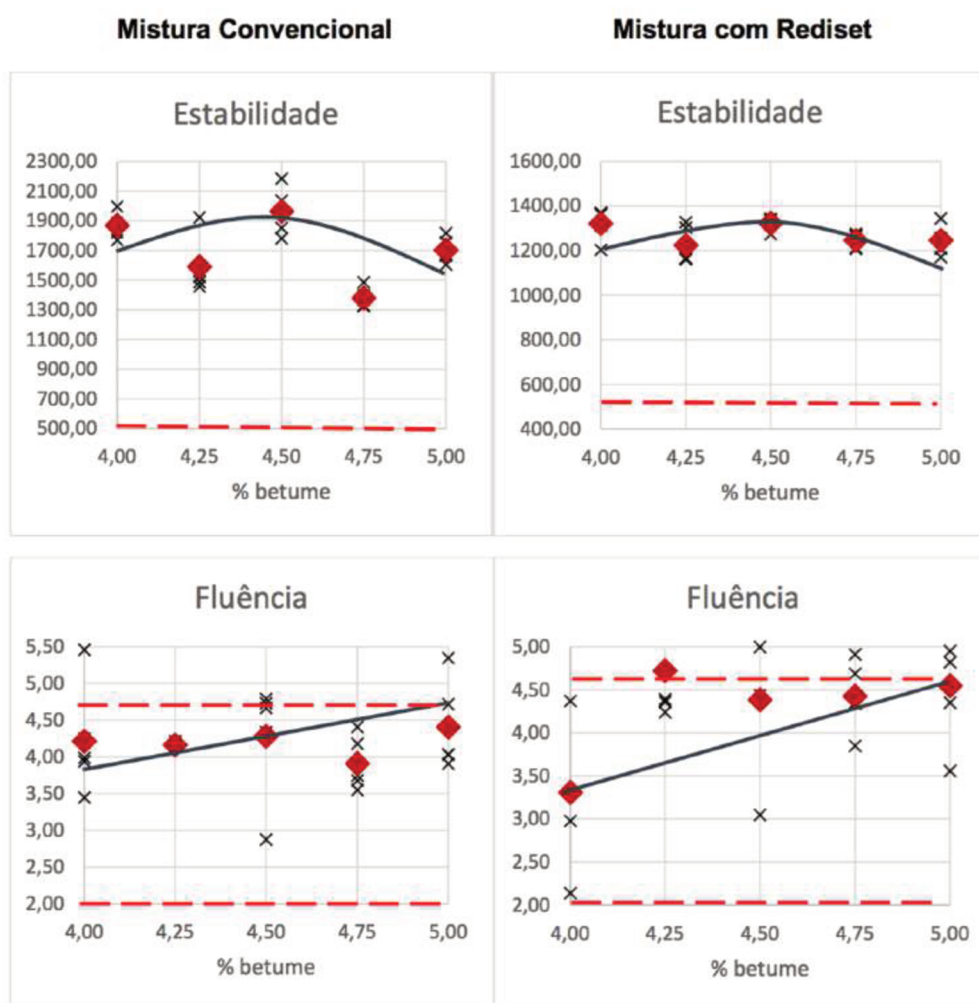
2.7.3 RESULTADOS DO CAP 50-70 MODIFICADO COM REDISSET

O estudo de Gumiel (2015) teve como objetivo analisar, a partir da Metodologia Marshall, parâmetros de misturas asfálticas mornas utilizando dois aditivos, o Rediset e o Evotherm. Para maior abrangência e avaliação dos dados, os resultados foram comparados com o de uma mistura asfáltica de controle, executada com o ligante primitivo, não modificado, CAP 50-70.

Neste estudo, os resultados de referentes a modificação do CAP 50-70 convencional com Rediset podem ser utilizados como comparativo para os resultados deste ensaio envolvendo o Rediset. Estes dados podem realçar o verdadeiro comportamento do ácido polifosfórico (PPA), quando utilizado mutuamente com Rediset.

Em seus resultados, Gumiel (2015) observou que o ligante modificado com Rediset obteve valores distintos a mistura de controle, principalmente no ensaio de estabilidade Marshall. Segundo Gumiel (2015) a mistura produzida com o CAP convencional atingiu números de quase 2000 kgf no ensaio de estabilidade Marshall, enquanto a mesma modificada com o aditivo surfactante teve seu ápice de compressão aos 1369kgf, como mostra a Figura 12.

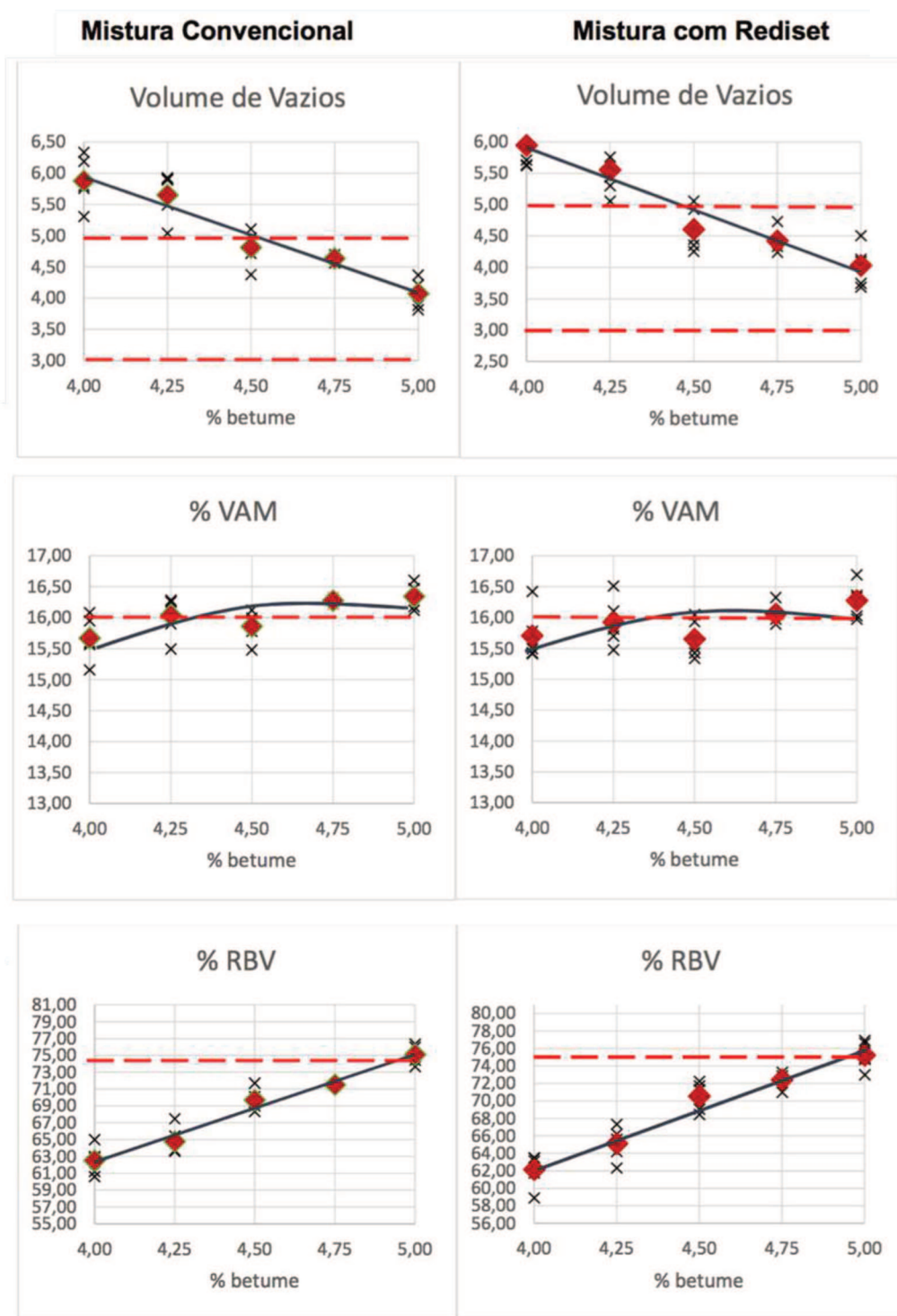
Figura 12 - Estabilidade e Fluência Marshall CAP 50-70 Convencional / CAP 50-70 Rediset



Fonte: GUMIEL (2015)

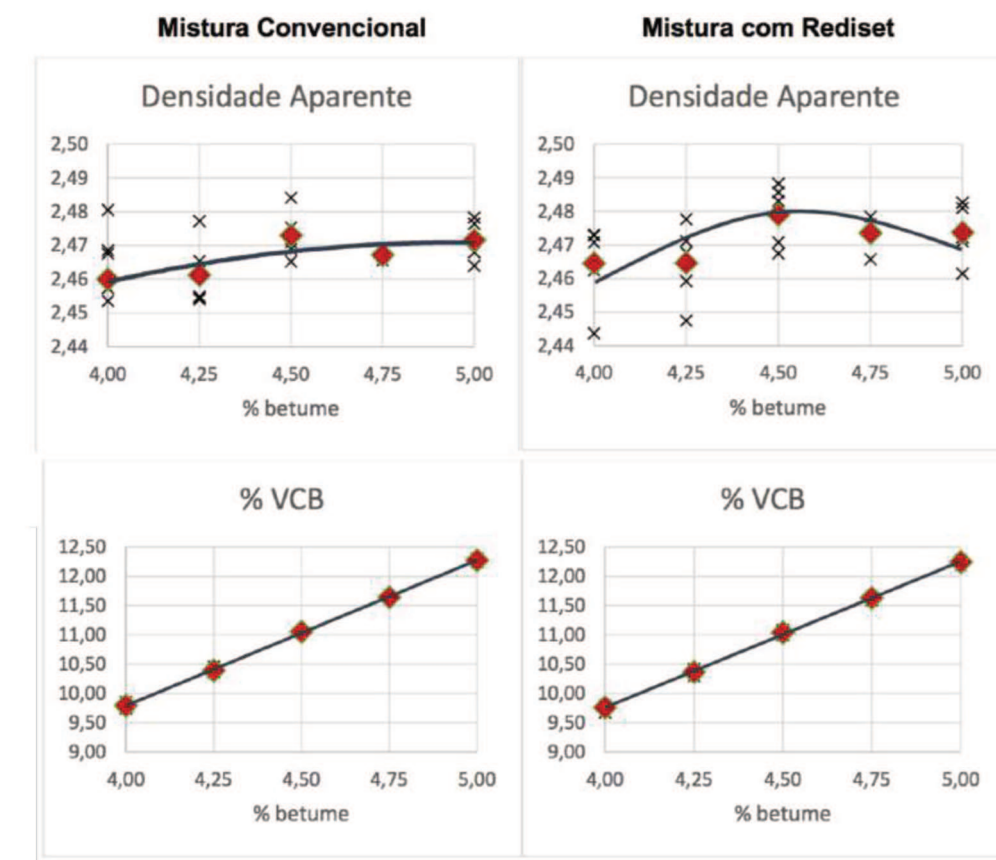
Na Figura 12, também é possível notar uma pequena variação entre as misturas no ensaio de fluência Marshall, porém esta variabilidade não foi comentada pela autora. Gumiel (2015) ainda afirma que, embora, a estabilidade Marshall da mistura modificada tenha sido comprometida, os resultados volumétricos nas duas misturas se dão de forma muito semelhante. Esta comparação de parâmetros volumétricos é ilustrada pelas Figura 13 e Figura 14, onde é possível confirmar a assertiva da autora.

Figura 13 - Volume de Vazios, Volume do Agregado Mineral e Relação Betume Vazios CAP 50-70 Convencional / CAP 50-70 Rediset



Fonte: GUMIEL (2015)

Figura 14 - Densidade Aparente e Vazios Cheio de Betume CAP 50-70 Convencional / CAP 50-70 Rediset



Fonte: GUMIEL (2015)

3 PROCEDIMENTO LABORATORIAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O procedimento laboratorial descrito neste capítulo está relacionado a caracterização do agregado selecionado para a mistura, a caracterização dos ligantes asfálticos modificados para o mesmo princípio e, por fim, a elaboração, caracterização e estudo de resistência dos corpos de prova, gerados pela combinação dos materiais anteriormente citados.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

3.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O agregado utilizado no estudo foi fornecido pela empresa Vogelsanger, localizada na Estrada Piraí, bairro Vila Nova na cidade de Joinville/SC, (Figura 15). Na ocasião, foram adquiridos quatro tipos de brita: filler, pó de brita, brita 1 (3/16" a 3/8") e brita 2 (3/8 a 3/4").

Figura 15 - Localização da Pedreira Vogelsanger



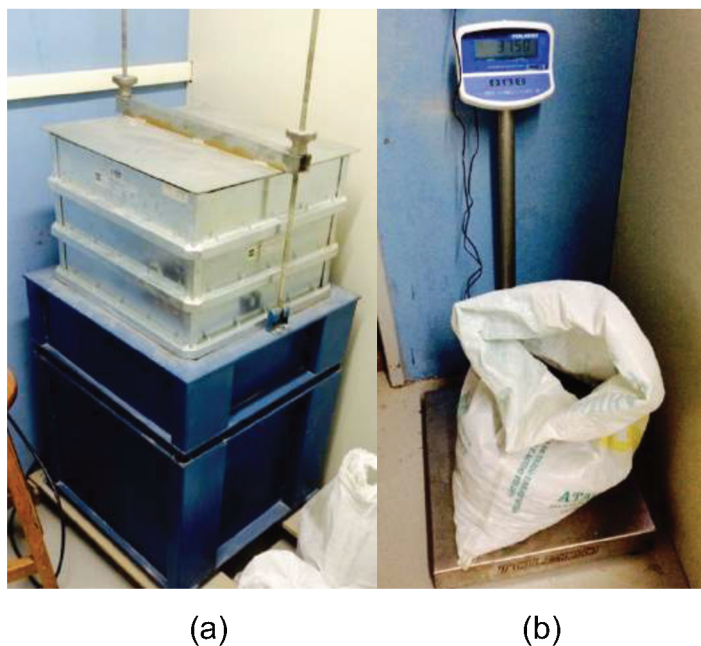
Fonte: Vogelsanger Minérios

Após sua doação, o material foi levado às instalações da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Campus Joinville, onde os ensaios de Abrasão Los Angeles, Densidade Real, Índice de Forma, Durabilidade e Granulometria por Peneiramento foram executados.

3.2.2 GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO E CURVA GRANULOMÉTRICA

Em laboratório, as quatro frações recolhidas na pedreira puderam ser separadas em onze frações distintas, por meio do processo de peneiramento. Para a separação/peneiramento e pesagem, é utilizado um peneirador de porte médio (Figura 16 (a)) e uma balança (Figura 16 (b)).

Figura 16 - Peneirador Granulométrico e Balança



Fonte: AUTOR

Com a curva granulométrica (que será apresentada mais adiante), é possível definir o peso necessário de cada fração a ser utilizado nas misturas asfálticas. A Tabela 4 mostra a quantidade total de material peneirado para que os cinquenta corpos de prova estudados pudessem ser produzidos.

Tabela 4 – Peso total necessários para os CP's

Peneiras	Peso (Kg)
19.1	0
12.7	10.63
9.5	6.37
4.76	11.77
2.2	9.10
1.2	5.06
0.6	4.15
0.3	2.90
0.15	2.05
0.075	1.42
FUNDO	3.41

Fonte: AUTOR

Após a obtenção do peso necessário para cada fração granulométrica, o material é devidamente estocado para posteriormente ser dividido entre os cinquenta corpos de prova a serem fabricados.

3.2.3 ENSAIO ABRASÃO LOS ANGELES

O Ensaio de Abrasão Los Angeles, como o nome já sugere, é utilizado para determinar a resistência à abrasão do agregado.

Para este ensaio, com a amostra seca, é utilizado 2500g do material granular passante na peneira 19,1mm e retido na peneira 12,7mm e outras 2500g do mesmo material, agora passantes na peneira 12,7 e retida na 9,5mm. Posteriormente, o material é despejado dentro do Equipamento de Ensaio Abrasão Los Angeles (Figura 17 (a)), junto com 11 esferas (Figura 17 (b)) de aço pré-estabelecidas pela norma (graduação B), devido a granulometria escolhida para o ensaio.

Figura 17 - Equipamento para Ensaio de Abrasão Los Angeles



(a)

(b)

Fonte: AUTOR

Após 500 giros do tambor, o material é peneirado novamente com as peneiras 12,7mm, 9,5mm e 1,7mm. Desta vez, o material passante da peneira 1,7mm é pesado, descartado e calculado em relação ao peso anterior ao ensaio, sendo esta diferença considerada perda em porcentagem. Conforme a Expressão 1.

$$LA = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (1)$$

onde:

LA = Perda por abrasão Los Angeles;

m_i = massa inicial da amostra;

m_f = massa final da amostra.

As especificações brasileiras para o uso de agregados em camadas de base e revestimento de pavimentos, normalmente limitam o valor do ensaio de abrasão Los Angeles entre 40 e 55%.

3.2.4 ENSAIO DE DENSIDADE REAL

O ensaio de densidade real é utilizado para se obter o peso específico do agregado a ser utilizado na mistura asfáltica. Esta propriedade é determinada através da relação entre a massa seca e o volume real do agregado.

Este ensaio se baseia em estabelecer peso e volume de seis amostras: duas para material graúdo (entre as peneiras 19,1mm e 4,8mm) e quatro para o material miúdo (passante da peneira 4,8mm). Estas amostras são pesadas dentro de um picnômetro (Figura 18) com peso vazio e peso completo de água conhecidos.

Figura 18 - Exemplo de Picnômetro



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

A pesagem da amostra no picnômetro, completado com um líquido com água, acontece após o uso de uma máquina de vácuo, que é utilizada para retirar todo ar retido de dentro do picnômetro (Figura 19), deixando assim o resultado mais consistente e sem a influência de possíveis bolhas de ar.

Figura 19 - Amostra dentro do vácuo



Fonte: SIROMA (2016)

O picnômetro é deixado por uma hora no aparelho de vácuo para a saída total do ar, podendo ser auxiliada por pequenos golpes na lateral do picnômetro durante o processo. Finalmente, o picnômetro é preenchido com água novamente até o menisco para completar o volume deixado pelo ar expelido e, então, o conjunto é pesado.

Os valores de massa e volume que são utilizados para o cálculo da densidade real do material são os seguintes:

- Peso da amostra seca (valor “B” nas expressões);
- Volume do picnômetro (valor “Vp” nas expressões);
- Peso do picnômetro vazio com rolha (valor “C” nas expressões);
- Peso do picnômetro e rolha com água;
- Peso do picnômetro e rolha com água e amostra a vácuo (valor “A” nas expressões).

Com as Expressões 2, 3, e 4 é possível encontrar, respectivamente, o volume da água, volume da amostra e a densidade real (D_r) da amostra.

$$V_a (\text{volume de água}) = \frac{A - B - C}{\text{densidade da água}} \quad (2)$$

$$V_b (\text{volume da amostra}) = V_a - V_p \quad (3)$$

$$D_r = \frac{B}{V_b} \quad (4)$$

A diferença de peso e o volume movimentado pela amostra, combinados com a densidade conhecida da água, resulta em um peso e volume da amostra que, se dividido um pelo outro, a densidade real é encontrada.

Após a densidade de cada uma das seis amostras serem encontradas, a média entre elas é tirada e dada como densidade real do agregado graúdo e miúdo.

3.2.5 ÍNDICE DE FORMA

Segundo Bernucci *et al.* (2008), a forma dos agregados influencia na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica.

O índice de forma (f) é o ensaio que mede a forma das partículas. Este índice varia de 0 a 1. Quando $f=0$, o material é considerado extremamente lamelar e quando $f=1$, de ótima cubicidade.

Para este ensaio, são separados 200 corpos do material: 100 do material retido na peneira 12,7mm e 100 do material passante da 12,7 e retido na 9,5mm. Os corpos são, então, medidos um a um (Figura 20), em sua maior e menor dimensão, bem como sua espessura.

Figura 20 - Medição para ensaio de Índice de Forma



Fonte: AUTOR

Após esta medição, duas razões entre as medidas são calculadas: a menor dimensão sobre a maior dimensão e a espessura sobre a menor dimensão.

Com isso, a média das razões é calculada e encontra-se uma média entre as razões além de um desvio padrão. Segundo a normatização que rege o ensaio de índice de forma, o limite mínimo de $f = 0,5$ é adotado para a utilização do agregado em misturas asfálticas.

3.2.6 ENSAIO DE DURABILIDADE

O ensaio de durabilidade consiste em atacar o agregado com solução de Sulfato de Sódio, podendo assim, observar como o agregado reage com este ataque químico que simula um possível processo de deterioração química para o meio ambiente quando utilizado em campo.

Para este ensaio foi tirado uma amostra seca de 1kg: 670g de material retido na peneira 12,7mm e 330g de material retido na peneira 9,5mm.

O ensaio se baseia em deixar a amostra imersa na solução por 24 horas (Figura 21) e logo após descansando em uma estufa a 100 C por mais 24 horas. Este processo deve ser repetido cinco vezes, totalizando 10 dias de ensaio.

Figura 21 - Amostra sendo posta em solução



Fonte: SIROMA (2016)

Após estes 10 dias, o material é lavado, peneirado novamente nas peneiras 12,7mm e 9,5mm e em seguida pesado para se obter a porcentagem de material perdido. A Figura 22, mostra como o material é encontrado momentos antes da lavagem.

Figura 22 - Material retirado da solução



Fonte: SIROMA (2016)

Segundo a normatização que rege o ensaio de durabilidade, o limite máximo de perda adotado para a utilização do agregado em misturas asfálticas é de 12% em relação a seu peso inicial.

3.2.7 CURVA GRANULOMÉTRICA

A escolha da curva granulométrica para a elaboração dos corpos de prova deste estudo foi feita a partir da fórmula de Talbot-Fuller. A Expressão 5 e curva granulométrica já foram utilizadas em estudos anteriores, como o de Barra (2005), Gumiel (2015) e Zagolin (2016). Segundo Guerrero (2013), esta fórmula possui a vantagem de oferecer uma curva granulométrica bem definida através da escolha do percentual passante na peneira de maior e menor diâmetro dentro da série de peneiras definida para o estudo. Como consequência, esta expressão procura um maior entrosamento entre as partículas, reduzindo o volume de vazios da mistura fazendo com que ela se torne mais perdurável.

$$P = a * (d/D)^n \quad (5)$$

onde:

- P = porcentagem da massa passante na peneira de diâmetro d;
- a = constante adotada com valor 100;
- d = diâmetro de abertura da peneira a ser calculada (mm);
- D = diâmetro da ultima peneira em que 100% do material é passante (mm);
- n = expoente resultante da calibração inicial entre as duas peneiras escolhidas.

A curva granulométrica utilizada (Tabela 5) neste estudo resultou em um expoente na ordem de 0,51, mesmo utilizado pelo estudo de Barra (2005), onde 100% do material é passante na peneira com diâmetro de abertura de 19,1mm, e 6% apenas, passante na peneira de menor diâmetro de abertura, 0,075mm.

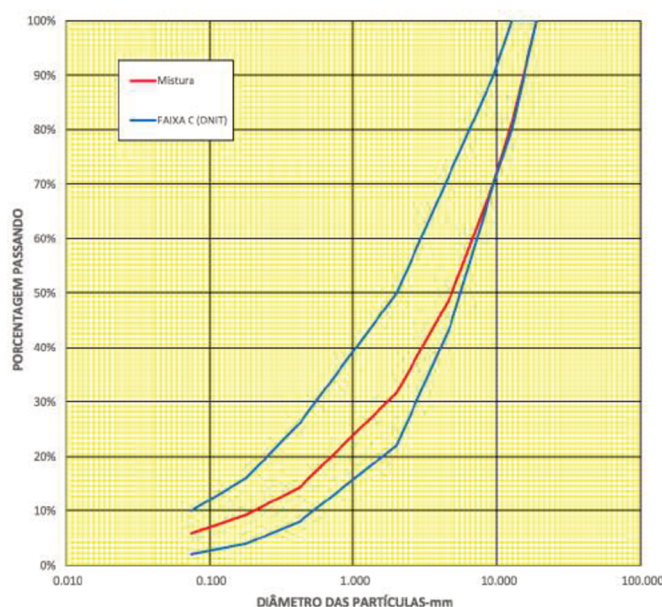
Tabela 5 - Porcentagem passante da curva granulométrica escolhida

Peneiras	% Passante
19.1	100.0%
12.7	81.3%
9.5	70.1%
4.76	49.4%
2.2	33.4%
1.2	24.5%
0.6	17.2%
0.3	12.1%
0.15	8.5%
0.075	6.0%

Fonte: AUTOR

É importante salientar que a curva granulométrica utilizada neste estudo também se encontra dentro da faixa C de trabalho estabelecida pelo DNIT para revestimentos asfálticos, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Ilustração da curva granulométrica dentro da Faixa C DNIT



Fonte: AUTOR

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

3.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O Cimento Asfáltico de Petróleo estudado neste trabalho se trata de um CAP 7-10 PPA, resultado da modificação de um CAP 50-70 convencional com Ácido Polifosfórico (PPA). O CAP 7-10 PPA foi fornecido para estudo pela empresa CBB Asfaltos já modificado.

Durante o tempo dedicado a este estudo, foram encontradas várias dificuldades devido ao pouco embasamento teórico disponível sobre a ação mútua do PPA e do Rediset (aditivo a ser misturado ao CAP) em um ligante. Além do fato de que o CAP estudado se trata de um material nunca antes caracterizado pelo autor. Viscosidades extremamente altas e temperaturas de trabalho além do convencional foram encontradas, questionadas e reanalisadas. Alguns dos ensaios de caracterização, bem como corpos de prova, tiveram de ser refeitos para que se obtivesse resultados confiáveis e satisfatórios.

Para a caracterização em questão foram feitos quatro ensaios principais: Ensaio de Massa Específica (ABNT NBR-6296), Penetração (ABNT NBR-6576), Ponto de Amolecimento (ABNT NBR-6560) e Viscosidade Brookfield (ABNT NBR-9393). Todos os ensaios foram feitos com ambos os ligantes, CAP 7-10 produzido com PPA e CAP 7-10 produzido com PPA e modificado com Rediset.

3.3.2 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA

O ensaio de Massa Específica, como sugere o nome, é realizado para se determinar a massa específica do ligante asfáltico.

Este ensaio possui o mesmo procedimento que o ensaio de densidade real dos agregados, já apresentado no item 3.2.3, unicamente diferenciando-se pelo fato de que não foi utilizado vácuo para este ensaio. A grandeza resultante faz-se de uso da relação de massas e volumes conhecidos de um picnômetro e de um líquido com densidade também conhecida, neste caso, a água.

Primeiramente foi pesado o picnômetro vazios e depois completamente cheio de água. Após, foi obtido o peso do picnômetro com uma amostra do ligante asfáltico estudado. Ao todo, foram pesadas três amostras do ligante.

A Figura 24 mostra o picnômetro usado com as amostras de ligante já no interior do recipiente.

Figura 24 - Picnômetros com CAP 7-10 para ensaio de Massa Específica



Fonte: AUTOR

Com o volume do picnômetro conhecido, e os pesos do picnômetro e rolha, picnômetro e rolha mais água, picnômetro mais amostra e picnômetro mais amostra mais água é possível conhecer a massa específica do ligante.

3.3.3 ENSAIO DE PENETRAÇÃO

O ensaio de Penetração tem como objetivo analisar a penetração em décimos de milímetros que um Penetrômetro (Figura 25) especificado por norma exerce em uma amostra de ligante betuminoso. Esta grandeza é a que define e classifica os ligantes asfálticos no Brasil, como já citado.

Figura 25 - Ensaio de Penetração



Fonte: AUTOR

Durante cinco segundos é aplicado um peso de 100g sobre o ligante. Após este curto tempo, a espessura penetrada pela agulha é apresentada pelo leitor em 0,01mm. É estritamente obrigatório que os resultados deste ensaio de penetração estejam dentro da especificação do ligante. Caso o contrário, o ligante está fora do referenciado pelo fabricante, e não pode ser utilizado como fora denominado.

3.3.4 ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO

O ensaio de Ponto de Amolecimento é feito com o conjunto Anel Bola, cujo objetivo é conhecer a temperatura onde o ligante amolece.

Neste ensaio são utilizados dois anéis preenchidos com ligante (Figura 26). Estes anéis são então acomodados dentro de uma pequena estrutura de ferro com uma esfera metálica sobre cada uma das amostras.

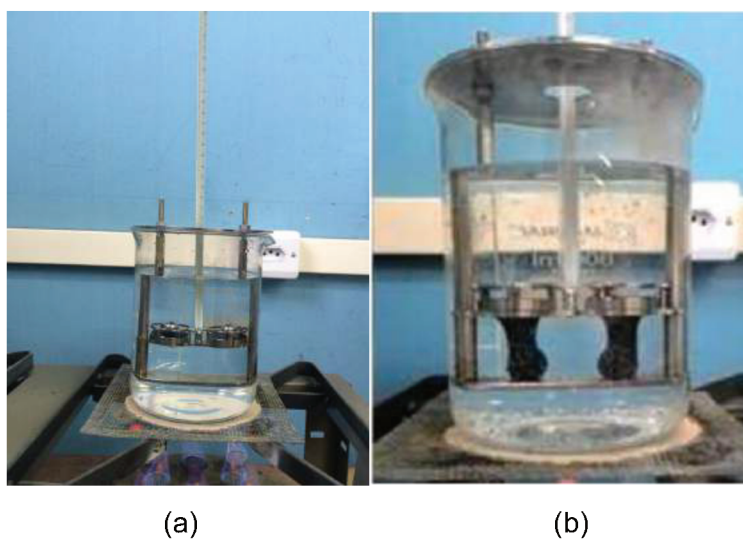
Figura 26 - Anéis preenchidos com CAP



Fonte: AUTOR

Este conjunto então é submerso em água e aquecido (Figura 27 (a)). Este aquecimento deve ser constante e, como normatizado, a 5°C por minuto.

Figura 27 - Início e ponto de medição do ensaio de Ponto de Amolecimento



Fonte: AUTOR

No instante em que o ligante toca a barra metálica inferior do instrumento (Figura 27 (b)), a temperatura é medida por meio do termômetro e considerada de amolecimento do ligante.

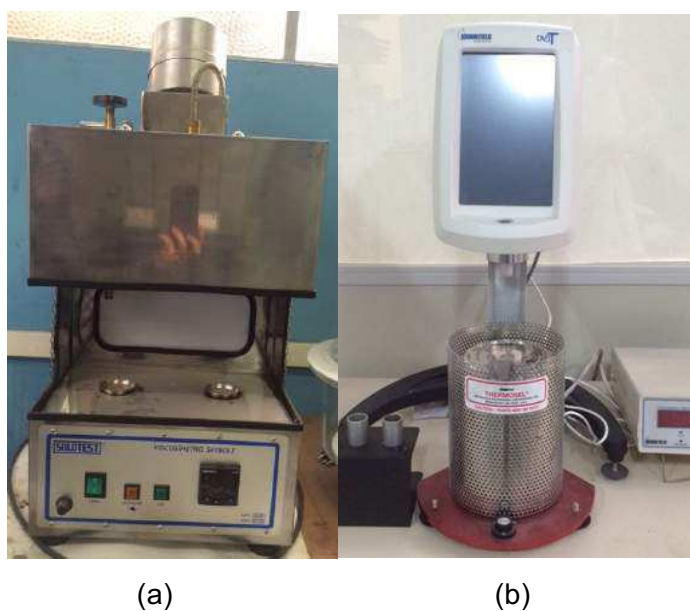
3.3.5 ENSAIO DE VISCOSIDADE

O ensaio de viscosidade é adotado para encontrar as temperaturas de trabalho do CAP em questão.

Existem várias metodologias para a medição da viscosidade dos ligantes. Atualmente duas metodologias são utilizadas com frequência e segurança para tal objetivo. São elas:

- A metodologia Saybolt-Furol, que realiza uma medição indireta da viscosidade, correlaciona o valor desta grandeza a uma unidade de tempo, Segundo Saybolt-Furol (SSF). O ensaio acontece através do equipamento de viscosidade com mesmo nome (Figura 28 (a)), onde se é computado o tempo em que 60 ml de ligante fluem através do orifício do equipamento em uma determinada temperatura (DNER-ME004/94);
- A metodologia Brookfield, que calcula a viscosidade direta do ligante. Sua medição é feita no equipamento Brookfield (Figura 28 (b)), em unidade centipoise (cP), baseando-se na força/torque necessária para girar um eixo, normatizado, submerso no ligante a uma certa rotação por minuto adotada (ABNT NBR 14541:2009).

Figura 28 - Equipamentos de Viscosidade



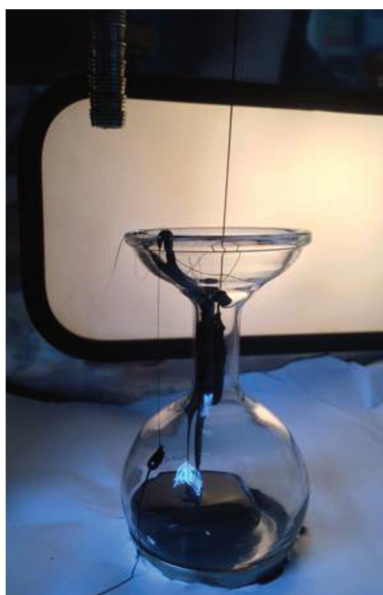
Fonte: AUTOR

Em ambas as metodologias, as temperaturas de usinagem e compactação são obtidas através da interpolação dos valores de suas unidades encontrados e os valores normatizados para tal.

Para o ensaio de viscosidade pela metodologia Saybolt-Furol, as temperaturas de trabalho, segundo Bernucci *et al.* (2008), devem ser tal que sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150 SSF para usinagem, e entre 125 e 155 SSF para compactação. Já para o ensaio de viscosidade pela metodologia Brookfield, as faixas de temperaturas de trabalho são, segundo Bernucci *et al.* (2008), correspondentes a viscosidade entre 150 a 170 cP, e 250 a 310 cP, para usinagem e compactação, respectivamente.

No procedimento para a obtenção da viscosidade do ligante estudado, a análise desta pelo ensaio Saybolt-Furol se tornou impossível devido a viscosidade extremamente alta do CAP. Nesta tentativa de ensaio, o ligante, mesmo em altas temperaturas, se comportou de forma bem rígida, aderindo as paredes do frasco coletor (Figura 29).

Figura 29 - Tentativa de caracterização da viscosidade pelo Ensaio Saybolt-Furol



Fonte: AUTOR

Optou-se, então, pelo ensaio Brookfield (Figura 30). Este, além de gerar resultados mais precisos e valores diretos de viscosidade sem a necessidade de correlações, ocorreu normalmente, resultando em valores confiáveis.

Figura 30 - Ensaio de viscosidade Brookfield



Fonte: AUTOR

3.3.6 MODIFICAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO

Como já citado, o CAP 7-10 PPA foi fornecido para este estudo pela empresa CBB Asfaltos já modificado. Sua modificação, feita a partir de um CAP 50-70, foi relatada pela empresa como uma simples homogeneização de ambos os materiais a uma temperatura de 180°C para que o CAP estivesse em estado líquido suficiente para ser bombeado pelos reatores. A formulação e porcentagem de PPA na mistura em relação ao ligante a ser modificado não foi revelada pelo fornecedor por se tratar de um segredo industrial. A Figura 31 mostra o estado em que o CAP 7-10 modificado com PPA chegou para estudo.

Figura 31 - CAP 7-10 PPA em temperatura ambiente



Fonte: AUTOR

Nesta figura, pode-se notar uma diferença com CAP convencional já pela forma em que o ligante se acomoda no recipiente. Normalmente, um CAP convencional tende a se acomodar de forma simples, plana e homogênea, diferente do formato côncavo que a Figura 31 apresenta.

Segundo estudos encontrados, como de Fernandes e Alencar (2011), Pereira (2010) e Dourado (2011), a modificação de CAP com PPA ainda é pouco compreendida quimicamente. Como já citado, o que se sabe é que o PPA aumenta consideravelmente os níveis de asfaltenos no ligante, porém, nenhuma informação sobre reações anormais em temperatura ambiente foi encontrado. Sendo assim, não é possível chegar a uma conclusão exata de que tipo de reação provoca este abaulamento superficial. A fornecedora também não pode explicar por, segundo a mesma, o PPA ser um tipo de modificador recente, ainda em fase experimental e não completamente compreendido.

Após uma análise prévia do ligante recebido pelo fornecedor, a modificação do CAP 7-10 PPA com o aditivo Rediset foi efetuada. Foram utilizados 2% do peso do ligante de aditivo Rediset para a modificação do CAP. O intuito desta modificação é reduzir as temperaturas de trabalho do ligante. Sua modificação foi dada pela homogeneização dos dois materiais a uma temperatura 30° C abaixo da temperatura ideal de usinagem do CAP 7-10 PPA (203° C).

A Figura 32 abaixo mostra o momento da homogeneização do CAP 7-10 PPA com o Rediset a temperatura desejada, 173° C.

Figura 32 - Modificação do CAP 7-10 PPA com Rediset



Fonte: AUTOR

Para a modificação ter sucesso, o Rediset foi aquecido anteriormente a homogeneização a mesma temperatura do ligante, ficando em estado líquido e pronto para a usinagem.

Após a modificação, pode-se notar que o abaulamento mostrado na Figura 31, antes normal a temperatura ambiente, havia sumido. Novamente, é necessário enfatizar que as referências como de Fernandes e Alencar (2011) e outras já citadas não apontam uma causa comprovada da ação do PPA sobre o ligante. Logo, até a data de publicação deste trabalho, é abstrato ao autor a interação e reação química entre ambos os aditivos mutuamente incorporados ao ligante.

3.4 ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A elaboração dos corpos de prova foi fundamentada na Metodologia Marshall. Cada corpo de prova Marshall possui 100mm de diâmetro e 63.5mm de altura, formando um cilindro.

Foram misturados e compactados 25 corpos de prova para cada CAP, totalizando 50. Para ambos as misturas, foram utilizados teores de ligante interno,

cujo peso total teórico (agregado e ligante) é de 1200g. Os teores utilizados foram: 4,25%, 4,75%, 5,25%, 5,75% e 6,25%. Com pesos para as misturas de, respectivamente, 51g, 57g, 63g, 69g e 75g. Cada teor de ligante gerou 5 corpos de prova, afim de encontrar um teor de ligante ótimo.

3.4.2 MISTURA

Para a mistura, o agregado, separado entre agregado miúdo (passante na peneira N° 4) e agregado graúdo (retino até a peneira N° 4), é colocado em uma estufa, 10°C acima da temperatura de usinagem do ligante, durante 12 horas, afim de remover quaisquer resquícios de humidade (Figura 33).

Figura 33 - Secagem dos agregados



Fonte: AUTOR

Ambos os ligantes devem ser aquecidos a uma temperatura de usinagem e compactação de 203°C e 173°C, para o CAP 7-10 PPA e CAP 7-10 PPA modificado com Rediset, respectivamente.

Após a homogeneização dos ligantes as respectivas temperaturas, o peso indicado para cada teor de ligante é adicionado ao agregado graúdo e misturado manualmente. Por fim, é adicionado o agregado miúdo a mistura e, novamente, homogeneizado. Esta ordem preferencial se deve ao rápido envolvimento do agregado fino com o ligante que, se invertida, dificultaria a mistura manual. O processo de mistura foi feito manualmente (Figura 34).

Figura 34 - Mistura do agregado com o ligante



Fonte: AUTOR

É importante destacar que, por mais que o ligante estivesse a uma temperatura elevada e “ideal” para usinagem, a trabalhabilidade da mistura com baixos teores de ligante ficou comprometida. Principalmente para os corpos de prova com baixo teor de ligante, a dificuldade de aderência e mistura do CAP perante os agregados se tornou um ponto crítico. Aos olhos dos envolvidos no processo, a mistura ainda parecia pouco trabalhável, tornando-a um tanto quanto heterogênea, se aderindo a maior parte da superfície dos agregados, mas não a toda ela. A partir de um teor de ligante de 5,75%, o manuseamento da mistura para a aderência total à superfície do agregado se tornou possível. A Figura 35 apresenta uma mistura com 4.25% de ligante, misturada ao máximo e pronta para a compactação.

Figura 35 - Mistura asfáltica pronta para compactação



Fonte: AUTOR

3.4.3 COMPACTAÇÃO

Após o processo de mistura, a massa asfáltica é posta para descanso por duas horas dentro de uma estufa a sua temperatura de compactação, 196°C e 166°C, para CAP 7-10 PPA e CAP 7-10 PPA modificado com Rediset, respectivamente.

O processo de compactação, que faz uso do Compactador Marshall (Figura 36), seguiu a metodologia estabelecida pela norma DNER-ME 043/95, na qual são aplicados 75 golpes em cada face do corpo de prova.

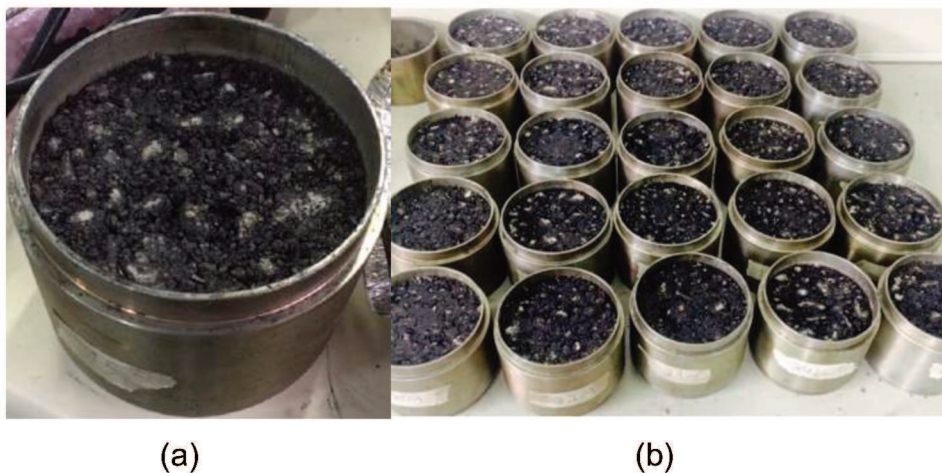
Figura 36 - Compactador Marshall



Fonte: AUTOR

Os corpos de prova são apresentados nas Figura 37 (a) e Figura 37 (b), ainda no interior dos moldes.

Figura 37 - Corpos de prova após compactação

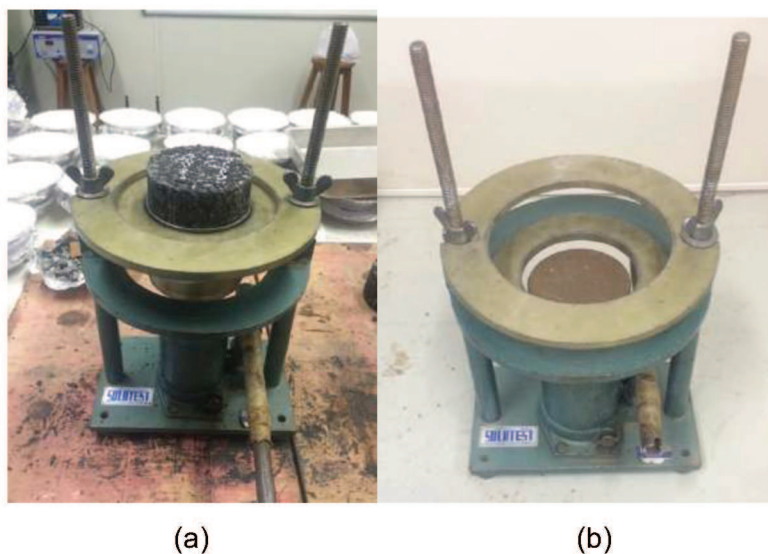


Fonte: AUTOR

3.4.4 DESMOLDE DOS CORPOS DE PROVA

Após um repouso de 24 horas, os 50 corpos de prova passam pelo processo de desmolde, sendo cuidadosamente retirados dos moldes com o auxílio de um macaco hidráulico específico para a função (Figura 38 (a) e Figura 38 (b)).

Figura 38 - Desmolde dos Corpos de Prova



Fonte: AUTOR

Durante a fase de desmolde foi observado que os corpos de prova provenientes da mistura com CAP 7-10 PPA (Figura 39) apresentaram uma aparência mais frágil que os provenientes da mistura com o ligante modificado com Rediset. Segundo a análise visual e tátil, a compactação dos CP's de CAP 7-10 PPA aparentou não ter proporcionado uma adesão adequada entre os materiais. Este acontecimento pode ter sido levado ao fato de que as misturas com baixo teor de ligante não puderam ser totalmente homogeneizadas. Acontecimento constatado no item 3.4.2.

Figura 39 - Corpos de Prova CAP 7-10 PPA



Fonte: AUTOR

3.5 ENSAIOS PARA CORPOS DE PROVA MARSHALL

3.5.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A Metodologia Marshall prevê um exame qualitativo dos corpos de provas a serem testados. Este exame analisa medidas como diâmetro, altura e massa específica. A partir destes e do ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall que se pode obter o teor ótimo de trabalho da mistura.

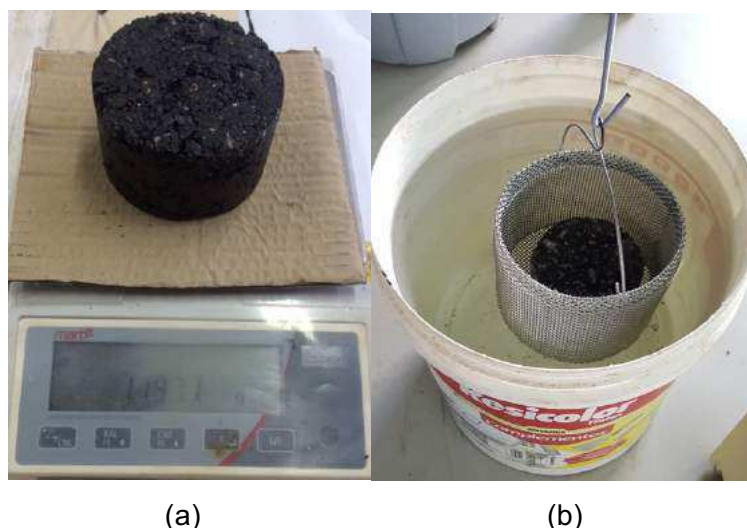
3.5.2 ENSAIOS CONVENCIONAIS DA METODOLOGIA MARSHALL

Os ensaios adotados como convencionais pela Metodologia Marshall são:

- Qualitativo: Massa específica, Volume de Vazios, Relação Betume/Vazios, Vazios do Agregado Mineral, Vazios Cheio de Betume e Densidade máxima teórica;
- Destrutivo: Estabilidade e Fluência Marshall.

Antes do ensaio destrutivo, obviamente, faz-se a determinação dos parâmetros qualitativos do corpo de prova. Nele, os corpos de prova são submetidos a medições de altura, diâmetro, peso seco (Figura 40 (a)) e peso submerso (Figura 40 (b)).

Figura 40 - Corpo de Prova em pesagem



(a)

(b)

Fonte: AUTOR

Com o conhecimento dos pesos e volumes dos corpos de prova, é possível associar as densidades obtidas nos ensaios de densidade do material pétreo e agregado para se obter parâmetros como: Massa Específica Aparente (G_{mb}), Densidade Máxima Teórica (DMT), Volume de Vazios (V_v), Vazios do Agregado Mineral (VAM), Relação Betume Vazios (RBV) e Vazios Cheio de Betume (VCB), respectivamente apresentados pelas Expressões 6, 7, 8, 9, 10 e 11.

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{s_{sub}}}$$

(6)

onde:

G_{mb} = Massa Específica Aparente do corpo de prova;

M_s = Massa seca do corpo de prova;

M_{Ssub} = Massa seca submersa do corpo de prova.

$$DMT = \frac{100}{\sum \frac{\%_{mat}}{d_{mat}}} \quad (7)$$

onde:

DMT = Densidade Máxima Teórica do corpo de prova;

$\%_{agr}$ = Porcentagem do material no corpo de prova (agregado graúdo, fino, filler e asfalto);

d_{mat} = Densidade do material no corpo de prova (agregado graúdo, fino, filler e asfalto);

$$V_v = \frac{DMT - G_{mb}}{DMT} \quad (8)$$

onde:

V_v = Volume de Vazios do corpo de prova;

DMT = Densidade Máxima Teórica do corpo de prova;

G_{mb} = Massa Específica Aparente do corpo de prova.

$$VAM = 100 - \left(\frac{G_{mb} * \sum \%n}{G_{sb}} \right) \quad (9)$$

onde:

VAM = Vazios do Agregado Mineral;

G_{mb} = Massa Específica Aparente do corpo de prova;

$\%n$ = Porcentagem em massa dos agregados;

G_{sb} = Massa Específica Aparente da composição de agregados.

$$RBV = \left(\frac{VAM - V_v}{VAM} \right)$$

onde: (10)

RBV = Relação Betume Vazios do corpo de prova;

VAM = Vazios do Agregado Mineral;

V_v = Volume de Vazios do corpo de prova.

$$VCB = \frac{Gmb * \%_{asfalto}}{d_{asfalto}} \quad (11)$$

onde:

VCB = Vazios Cheio de Betume;

Gmb = Massa Específica Aparente do corpo de prova;

$\%_{asfalto}$ = Teor de asfalto contido no corpo de prova;

$d_{asfalto}$ = Densidade do asfalto.

Posterior a estas medições, os corpos de prova são submetidos ao ensaio destrutivo, conhecido como Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall. Este ensaio é executado em um equipamento nomeado de Prensa Marshall (Figura 41).

Figura 41 - Prensa Marshall utilizada



Fonte: AUTOR

Segundo a norma DNER-ME 043/95, o corpo de prova deve ser submerso por 30 minutos em banho-maria, a uma temperatura exata de 60°C (Figura 42) e, após

este tempo, ser imediatamente acomodado no molde de compressão (Figura 43) e, então, ensaiado.

Figura 42 - Corpos de Prova em banho-maria



Fonte: AUTOR

Figura 43 – Corpo de prova no molde de compressão Marshall



Fonte: AUTOR

Durante o procedimento de ensaio, por meio da Prensa Marshall, o corpo de prova é submetido à compressão (Figura 44) até seu rompimento. Este ato, definido por Bernucci *et al.* (2008) como a quebra ou deslocamento do agregado, de modo a causar a redução da carga suportada pelo corpo de prova, resulta na obtenção de dois parâmetros:

- Estabilidade (*kgf*): carga máxima a qual o corpo-de-prova resiste antes da ruptura;

- Fluência (*mm*): deslocamento na vertical apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação da carga de ruptura.

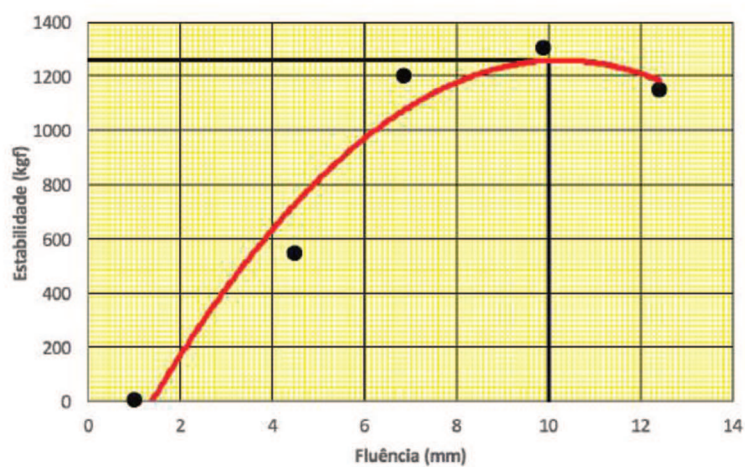
Figura 44 - Corpo de Prova no ensaio de Estabilidade Marshall



Fonte: AUTOR

Para auxiliar no processo de aquisição destes dados de ensaio, o software MyPCLab foi calibrado e utilizado. Os valores gerados pelo software geram um gráfico da estabilidade em função da fluência, como exemplificado na Figura 45.

Figura 45 - Exemplo de Gráfico Resultado Estabilidade Marshall



Fonte: AUTOR

É importante salientar que os valores de estabilidade Marshall obtidos neste ensaio são, antes de utilizados, corrigidos pela Expressão 12, devido a pequena variação de altura gerada pela compactação dos corpos de prova (BERNUCCI *et al.*, 2008).

$$f = 927,23 * h^{-1,64} \quad (12)$$

onde:

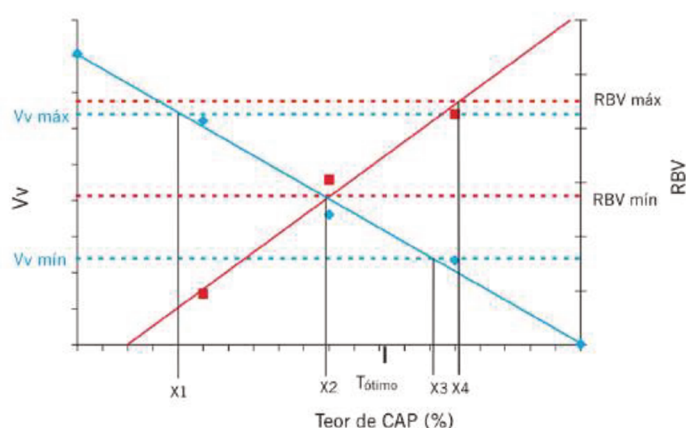
f = Fator de correção;

h = Altura/espessura do corpo de prova.

3.5.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE TRABALHO DA MISTURA

Como já discutido no item 2.6.2, a Metodologia Marshall apresenta diversas formas de se obter o teor ótimo de trabalho da mistura. O método inicialmente adotado pelo autor, se baseia em interseccionar os gráficos gerados pelos valores obtidos de Volume de Vazios e Relação Betume Vazios com os respectivos limites mínimos de ambos os parâmetros, como ilustrado pelo gráfico da Figura 46.

Figura 46 - Exemplo de Cálculo de Teor Ótimo de Betume



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

Neste gráfico, as linhas horizontais tracejadas representam limites de Volume de Vazios e Relação Betume Vazios, que variam conforme a finalidade da mistura (Tabela 6).

Tabela 6 - Limites de Volume de Vazios e Relação Betume Vazios segundo DNIT

Faixas	Limites por Norma DNIT			
	Vv		RBV	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
A	4	6	65	72
B e C	3	5	75	82

Fonte: AUTOR

Logo, observando a Figura 46, o teor de trabalho da mistura é dado pela Expressão 13.

$$T_{\text{ótimo}} = \frac{X2 + X3}{2} \quad (13)$$

onde:

$T_{\text{ótimo}}$ = Teor Ótimo de trabalho da mistura;

$X2$ = Intersecção da linha de RBV com os limites mínimos de RBV selecionados;

$X3$ = Intersecção da linha de V_v com os limites mínimos de V_v selecionados.

Infelizmente, como será comentado no capítulo 4, Resultados e Análise de Resultados, este método tornou-se falho e foi descartado pelo autor devido a um volume de vazios inesperadamente alto apresentado pelos corpos de prova. Logo, optou-se pela análise do conjunto de resultados, parâmetros e observações no momento da usinagem da mistura, dado pelos envolvidos neste trabalho.

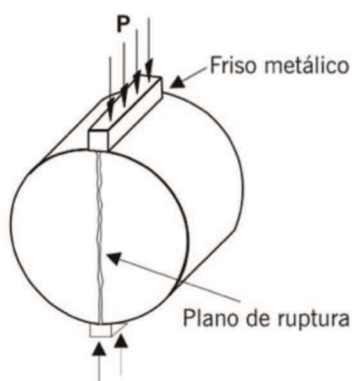
3.5.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO INDIRETA

O ensaio de Resistência a Tração Indireta (RTI) é um ensaio que fornece, como o nome já sugere, um valor de resistência a tração do corpo de prova. Segundo Bernucci *et al.* (2008), este parâmetro tem se mostrado muito importante para revestimentos flexíveis pois, em campo, o revestimento asfáltico sofre várias reações impostas pelo tráfego.

O ensaio brasileiro de RTI é feito pela compressão diametral de um corpo de prova, utilizando o mesmo tipo de prensa (Figura 41) que o ensaio convencional Marshall, além de utilizar os mesmos corpos de prova cilíndricos da mesma metodologia.

Segundo a norma brasileira que o rege (ABNT NBR 15087/2004), este ensaio gera uma compressão no corpo de prova através de frisos de carga com 12,7mm de largura e curvatura adequada ao corpo de prova padrão Marshall. Estes frisos produzem uma força de tração perpendicular a compressão (Figura 47).

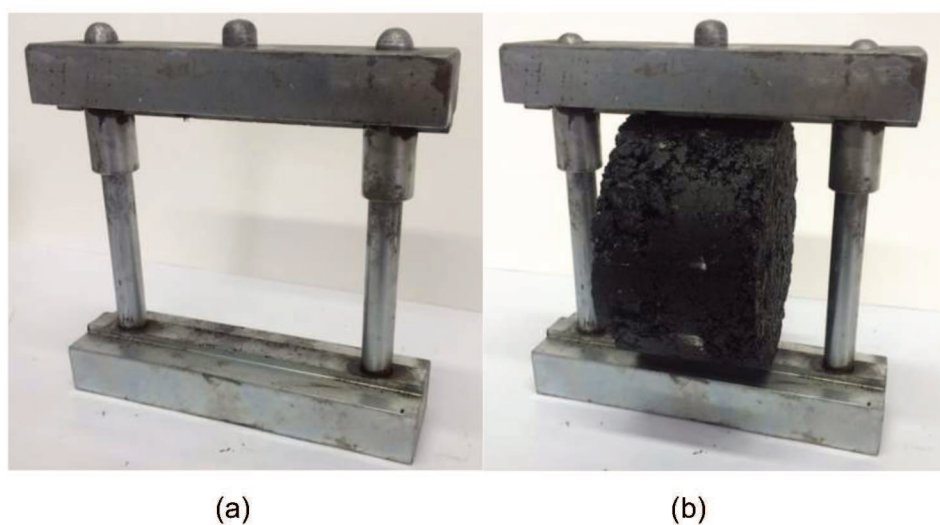
Figura 47 - Ilustração Ensaio RTI



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008)

Para o procedimento deste ensaio, o corpo de prova deve estar em um ambiente a 25°C por, pelo menos 4 horas, como normatizado. Posterior ao repouso, o corpo de prova é levado para um dispositivo centralizador, que apoia o corpo de prova apenas pelos frisos de carga (Figura 48 (a) e (b)).

Figura 48 - Frisos de carga para ensaio RTI



(a)

(b)

Fonte: AUTOR

Durante o ensaio RTI, o corpo de prova é comprimido até sua ruptura (Figura 49 (a) e (b)).

Figura 49 - Ensaio de Resistência a Tração Indireta



(a)

(b)

Fonte: AUTOR

De acordo com a norma, como resultado, a compressão de ruptura medida pelo ensaio deve ser transformada em uma tensão de tração uniforme. Esta tensão se dá pela Expressão 14.

$$\sigma_{xx} = \frac{P}{\pi R} \quad (14)$$

onde:

σ_{xx} = Tensão de tração uniforme na direção x;

P = Força aplicada por unidade de espessura do cilindro;

R = Raio do cilindro.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o ensaio de Resistência a Tração Indireta vem sendo cada vez mais usual para as misturas asfálticas. Como exemplo, é possível encontrar especificações de misturas asfálticas e até normas brasileiras, como a DNIT 031/2004-ES, que traz um valor mínimo de resistência a tração de 0,6MPa para concretos asfálticos.

4 RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises dos mesmos, os quais representam os resultados obtidos para a caracterização dos ligantes, dos agregados e das misturas asfálticas, estas últimas analisadas a partir da metodologia de dosagem Marshall.

Os resultados deste trabalho são, ainda, correlacionados aos obtidos nos trabalhos de Gumiel (2015) e Zagolin (2016). Estes resultados, já referenciados no capítulo 2, servem como base para observar a influência dos aditivos utilizados para a modificação do CAP, dado que nestas pesquisas foram utilizados os mesmos princípios conceptivos da mistura asfáltica, no referente à granulometria, material granular, e ligante asfáltico (CAP 50-70), todos provindo do mesmo fornecedor deste estudo.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

4.2.1 ENSAIO DE ABRASÃO LOS ANGELES

A Tabela 7 abaixo mostra os resultados obtidos pelo ensaio de abrasão Los Angeles, executado conforme o procedimento descrito no item 3.2.3.

Tabela 7 - Resultados do ensaio Abrasão Los Angeles

Fração	Peso antes (g)	Peso depois (g)	Perda (%)
19,10 - 12,70	2500	1241.9	
12,70 - 9,50	2500	1259.6	
Retido 1,70	-	1871.4	
TOTAL	5000	4372.9	12.54%

Fonte: AUTOR

Portanto, houve uma perda de 12,54% em relação ao peso da amostra anterior ao ensaio. Segundo a norma DNER-ME 035/98, esta perda encontra-se dentro dos limites aceitáveis: entre 40-55%.

4.2.2 ENSAIO DE DENSIDADE REAL

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos pelo ensaio de densidade real, executado conforme o procedimento descrito no item 3.2.4.

Tabela 8 - Resultados Ensaio Densidade Real

Graduação	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média (g/cm ³)
Agregado Graúdo	2.821	2.797	2.793	-	2.804
Agregado Miúdo	2.836	2.811	2.819	2.814	2.820

Fonte: AUTOR

4.2.3 ÍNDICE DE FORMA

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos pelo ensaio de índice de forma, executado conforme o procedimento descrito no item 3.2.5.

Tabela 9 – Resultados Ensaio Índice de Forma

Peneiras	Média	Desvio Padrão
19,10 - 12,70	0.679	0.153
12,70 - 9,50	0.689	0.403

Fonte: AUTOR

Logo, segundo a norma DNER-ME 086/94, o limite mínimo de $f=0,5$ é atendido pelas médias de ambas as granulometrias.

4.2.4 DURABILIDADE

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos pelo ensaio de durabilidade, executado conforme o procedimento descrito no item 3.2.6.

Tabela 10 - Resultados Ensaio Durabilidade

Resultados após os ciclos	
Peneira	Peso
19,10 - 12,7	644.1
12,70 - 9,50	336.4
Total	980.5
% Perda	1.95%

Fonte: AUTOR

Portanto, a amostra ensaiada segundo DNER-ME 089/94, em cinco ciclos de imersão-secagem com solução de sulfato de sódio encontra-se no limite de aceitação estabelecido pela Especificação de Material DNER - ME 037/97, item 7.1.5, cuja perda não deve ser superior a 12%.

4.2.5 RESUMO

Os resultados da Tabela 11 são referentes a caracterização dos agregados utilizados neste estudo. Nela, encontram-se as médias de cada amostra examinada para cada ensaio detalhado no capítulo 3, assim como as normas que as regem.

Tabela 11 - Resumo dos Resultados de Caracterização dos Agregados

Ensaio	Norma	Limite	Resultado
Los Angeles	DNER-ME 035/98	Inferior a 50%	12.54%
Densidade Real	DNER-ME 081/98	-	2.804 / 2.820
Índice de Forma	DNER-ME 086/94	Superior a 0,5	0.679 / 0.689
Durabilidade	DNER-ME 089/94	Inferior a 12%	1.95%

Fonte: AUTOR

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE

Como já discutido, a caracterização do ligante foi um desafio no decorrer deste estudo, dada a dificuldade na trabalhabilidade do ligante após o processo de modificação com Acido Polifosfórico (PPA). Vários ensaios tiveram de ser refeitos devido a elevada viscosidade do ligante nas condições de trabalho.

Os resultados, apresentados nos itens abaixo, referem-se aos ensaios de caracterização dos ligantes:

- CAP 7-10 fabricado com ácido polifosfórico (PPA);
- CAP 7-10 fabricado com ácido polifosfórico (PPA) e modificado com o aditivo Rediset.

4.3.1 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos pelo ensaio de massa específica, executado conforme o procedimento descrito no item 3.3.2.

Tabela 12 - Resultados Ensaio Massa Específica

Ligante	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média (g/cm ³)
CAP 7-10 PPA	0.994	0.998	0.997	0.996
CAP 7-10 PPA mod. Rediset	0.997	0.996	0.998	0.997

Fonte: AUTOR

Este ensaio não possui qualquer valor mínimo adotado por norma, pois os valores de densidade são utilizados para os cálculos de natureza volumétrica, para os quais existem referências e valores solicitados por norma.

4.3.2 ENSAIO DE PENETRAÇÃO

A Tabela 13 abaixo mostra os resultados obtidos pelo ensaio de penetração, executado conforme o procedimento descrito no item 3.3.3.

Tabela 13 - Resultados Ensaio Penetração

Prova	CAP 7-10 PPA	CAP 7-10 PPA mod. Rediset
	Temperatura: 23°C Penetração (mm)	Temperatura: 22°C Penetração (mm)
1	0.72	0.74
2	0.71	0.71
3	0.71	0.72
Média	0.71	0.72

Fonte: AUTOR

É possível notar que, embora muito perto do limite mínimo, as penetrações em ambas as amostras mostraram uma média dentro do esperado para este CAP, já que sua penetração deve estar entre 7 e 10 décimos de milímetros.

4.3.3 ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO

A temperatura de ponto de amolecimento para o CAP 7-10 PPA encontrado nas especificações junto ao material recebido pelo fornecedor é de 106°C. Esta temperatura se encontra acima da temperatura de ebulição da água (100°C), fluido utilizado para este ensaio nas instalações da Universidade Federal de Santa Catarina

– Campus Joinville. Logo, tornou-se impossível a comprovação exata da temperatura de ponto de amolecimento.

A Tabela 14 mostra os resultados obtidos no ensaio, executado conforme o procedimento descrito no item 3.3.4.

Tabela 14 - Resultados Ensaio Ponto de Amolecimento

	CAP 10-20 PPA	CAP 10-20 PPA mod. Rediset
Temperatura Medida	101°C	95°C
Temperatura Prevista	106°C	106°C

Fonte: AUTOR

A tabela apresenta a temperatura especificada pelo fornecedor (referência) e os resultados encontrados durante o procedimento realizado no laboratório de Pavimentação da UFSC – Campus Joinville. Logo, para estes CAP's, os pontos de amolecimento não puderam ser precisamente comprovados devido ao fato de que a temperatura para alcançar o ponto de amolecimento estaria acima da temperatura necessária para atingir o ponto de ebulição da água. No entanto, seria possível identificar uma temperatura estimada para solucionar este déficit levando em conta o tempo de aquecimento, porém, a norma utilizada para a execução deste ensaio não especifica um procedimento caso este problema possa se apresentar. Sendo assim, optou-se por representar este resultado com a última temperatura lida (101°C), junto ao esclarecimento que a temperatura real de ponto de amolecimento é um pouco maior.

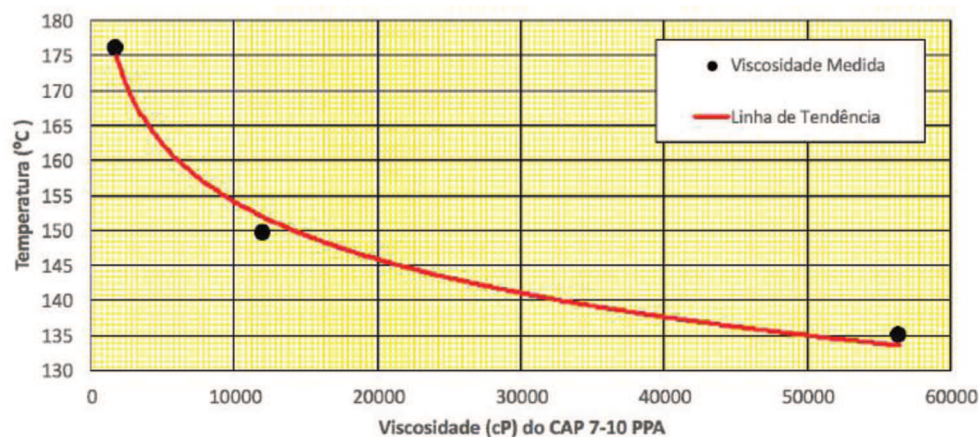
É importante enfatizar ainda que, embora o ligante modificado com Rediset não possua uma especificação para sua temperatura de ponto de amolecimento, o mesmo não deveria apresentar uma temperatura diferente do seu ligante original. Isso se deve ao fato de que o Rediset, como aditivo surfactante, não deveria apresentar influência nas propriedades físicas do ligante.

4.3.4 ENSAIO DE VISCOSIDADE

O ensaio de viscosidade foi feito pelas duas metodologias apresentadas no item 3.3.5. Para o ensaio de viscosidade Saybolt-Furol, os resultados não puderam ser coletados, como já mencionado no mesmo item.

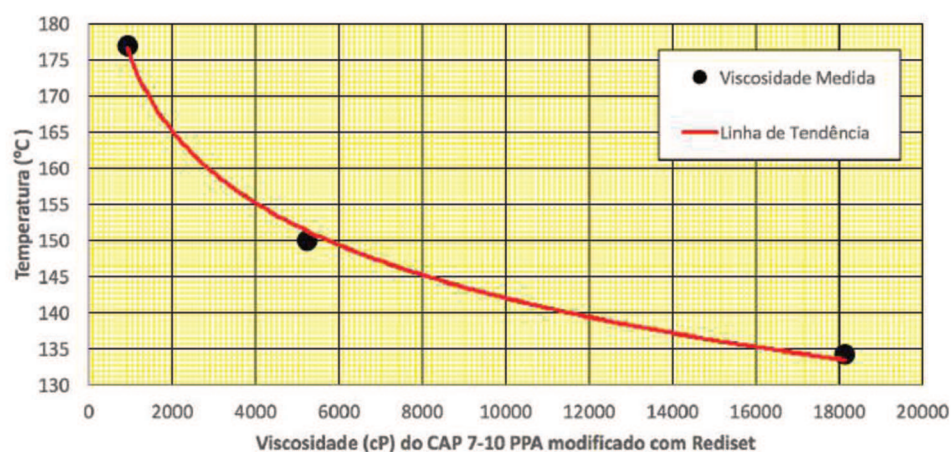
A Figura 50 e Figura 51 apresentam os gráficos gerados pelas viscosidades medidas no ensaio de viscosidade Brookfield.

Figura 50 - Curva de Viscosidade CAP 7-10 PPA



Fonte: AUTOR

Figura 51 - Curva de Viscosidade CAP 7-10 PPA mod. Rediset



Fonte: AUTOR

Os gráficos apresentados nas Figuras 50/51 foram elaborados de acordo com os dados apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados Ensaio de Viscosidade Brookfield

CAP 7-10 PPA		CAP 7-10 PPA mod. REDISSET	
Temperatura (°C)	Visc. (cP)	Temperatura (°C)	Visc. (cP)
176	1730	177	910
149.5	12000	150	5200
134.9	56400	134.3	18130

Fonte: AUTOR

Com os dados obtidos com a metodologia Brookfield foi possível determinar as temperaturas de trabalho dos ligantes. Estas temperaturas são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Temperaturas de trabalho dos ligantes

Função	Viscosidade (cP)	Temperaturas (°C)	
		CAP 7-10 PPA	CAP 7-10 PPA mod. Rediset
Usinagem	160	203.2	201.4
Compactação	280	196.6	193.3

Fonte: AUTOR

Nota-se, pelos gráficos e pelas tabelas apresentadas que as viscosidades reportadas por Bernucci *et al.* (2008) como as ideais para usinagem e compactação são obtidas em uma temperatura acima da temperatura máxima medida, necessitando que as temperaturas de trabalho estimadas fossem extrapoladas.

Embora as temperaturas de usinagem e compactação do CAP 7-10 PPA modificado com Rediset tenham sido estimadas do mesmo modo que as do CAP 7-10 PPA, as mesmas não foram utilizadas para o cumprimento do objetivo deste trabalho. Isso porque o Rediset é um aditivo que, teoricamente, não modifica a viscosidade do ligante, e sua redução de temperatura deve ser forçada entre 30°C e 40°C (MOTTA, 2011).

É interessante ressaltar ainda, que, embora as temperaturas de trabalho dos dois ligantes estejam muito próximas, após a modificação com Rediset, houve uma queda brusca na viscosidade deste. Segundo Guerrero (2013), o Rediset ativa a trabalhabilidade do ligante através de uma “adesão ativa”, sem produzir qualquer alteração na viscosidade do ligante, tornando este fenômeno de queda de viscosidade, incomum. Este resultado se encontra associado a utilização mútua ao PPA, cujo estudos ainda são incipiente e a bibliografia, escassa.

4.3.5 RESUMO

Os resultados da Tabela 17 são referentes a caracterização do ligante e sua modificação utilizados neste estudo. Nela, encontram-se as médias de cada amostra examinada para cada ensaio detalhado no capítulo 3, assim como as normas que as regem.

Tabela 17 - Resumo dos Resultados de Caracterização dos Ligantes

Ensaio	Norma	Limite	Resultados	
			CAP 7-10 PPA	CAP 7- 10 PPA mod. Rediset
Massa Específica	ABNT NBR 6296:2012	-	0.996 g/cm ³	0.997 g/cm ³
Penetração	ABNT NBR 6576:2012	0,7 a 1mm	0.71 mm	0.72 mm
Ponto de Amolecimento	ABNT NBR 6560:2012	-	101°C	95°C
Viscosidade Brookfield	ABNT NBR 14541:2009	Usinagem	203.2°C	201.4°C
		Compactação	196.6°C	193.3°C

Fonte: AUTOR

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

Neste item são apresentados os resultados obtidos com os corpos de prova produzidos pela metodologia de dosagem Marshall. Para cada teor foram produzidos, caracterizados e ensaiados 5 (cinco) corpos de prova com diâmetro médio de 100mm e 63.5mm de altura, totalizando 50 corpos de prova para os ensaios convencionais da Metodologia Marshall.

Posteriormente foram produzidos mais 3 (três) corpos de prova para cada teor ótimo e ensaiados para Resistência a Tração Indireta, cujos resultados também se encontram neste item.

4.4.1 ENSAIOS CONVENCIONAIS MARSHALL

A Tabela 18 e Tabela 19 apresentam os parâmetros volumétricos e mecânicos obtidos na caracterização dos corpos de prova executado conforme os procedimentos descritos no item 3.5.2. Nas tabelas, são apresentadas as médias dos cinco CPs de cada teor de ligante para cada parâmetro apresentado e formulado no mesmo item citado, incluindo seus limites por norma.

Tabela 18 - Parâmetros Volumétricos dos CP's com CAP 7-10 PPA

Parâmetros (Médias)	Teor de Betume Mistura CAP 7-10 PPA					Limites DNIT-ES 031/2006
	4.25%	4.75%	5.25%	5.75%	6.25%	
Densidade Aparente (g/cm ³)	2.29	2.30	2.34	2.38	2.39	-
Volume de Vazios (%)	12.14	10.99	8.82	5.18	4.13	3.0 a 5.0
RBV (%)	44.27	49.52	58.09	74.78	80.17	75% a 82%
DMT	2.61	2.59	2.57	2.55	2.52	-
Volume dos agregados (%)	21.70	21.76	20.93	20.52	20.71	mín. 16%
Vazios Cheio de Betume (%)	9.78	10.99	12.33	13.76	15.00	-
Estabilidade Marshall (kg)	1375.74	1524.88	1863.97	1884.60	1688.21	mín. 500
Fluência Marshall (mm)	5.29	6.826	4.896	5.808	4.956	2.0 a 4.6

Fonte: AUTOR

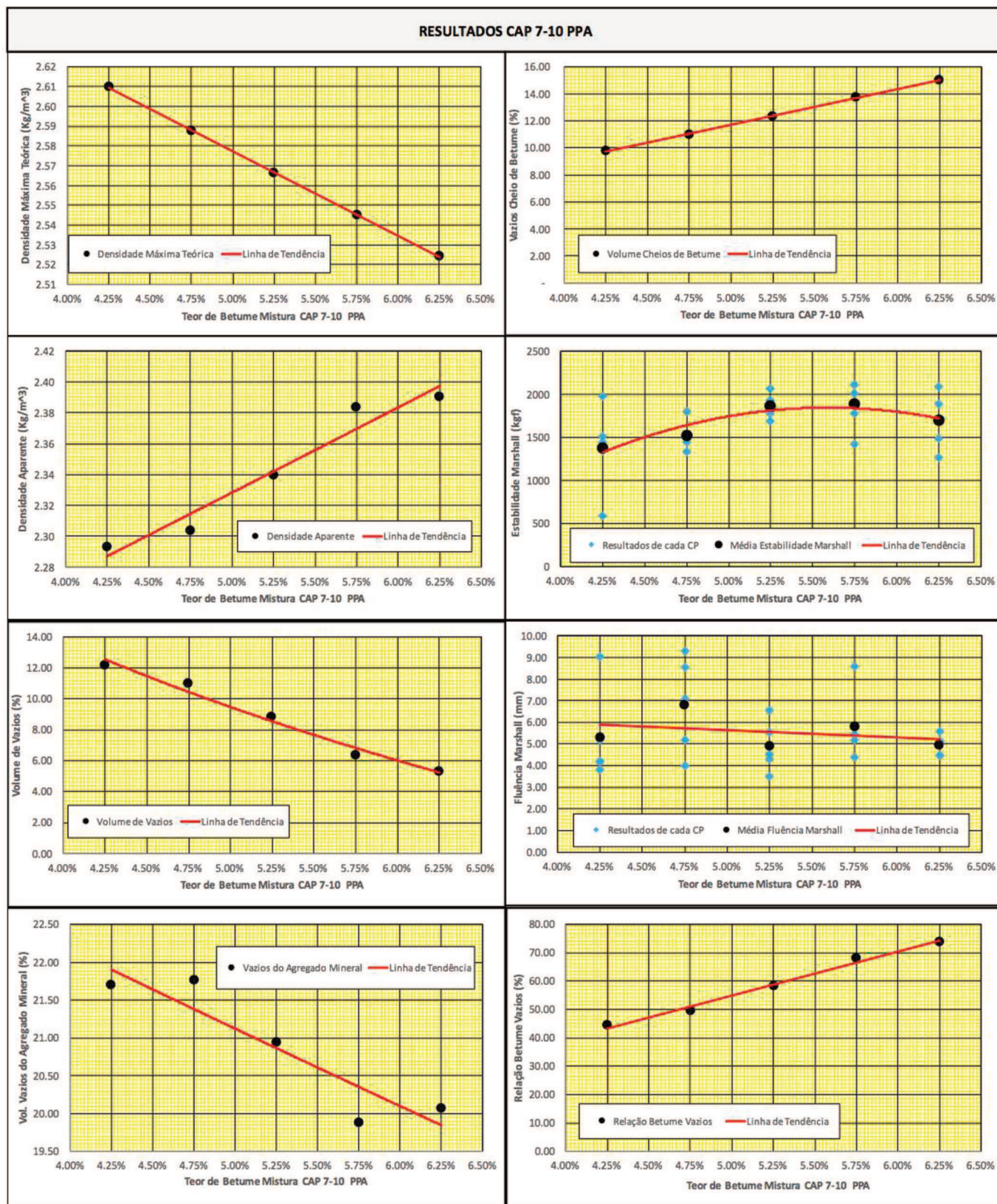
Tabela 19 - Parâmetros Volumétricos dos CP's com CAP 7-10 PPA mod. com Rediset

Parâmetros (Médias)	Teor de Betume Mistura CAP 7-10 PPA mod. com Rediset					Limites DNIT-ES 031/2006
	4.25%	4.75%	5.25%	5.75%	6.25%	
Densidade Aparente (g/cm ³)	2.32	2.35	2.37	2.36	2.37	-
Volume de Vazios (%)	11.17	9.03	7.66	6.09	4.89	3.0 a 5.0
RBV (%)	46.43	55.25	61.68	71.43	77.15	75% a 82%
DMT	2.61	2.59	2.57	2.55	2.52	-
Volume dos agregados (%)	20.84	20.03	19.93	21.27	21.34	mín. 16%
Vazios Cheio de Betume (%)	9.89	11.23	12.49	15.41	16.67	-
Estabilidade Marshall (kg)	1692.09	1963.85	1844.35	1787.39	1736.12	mín. 500
Fluência Marshall (mm)	5.47	4.836	5.12	3.872	4.376	2.0 a 4.6

Fonte: AUTOR

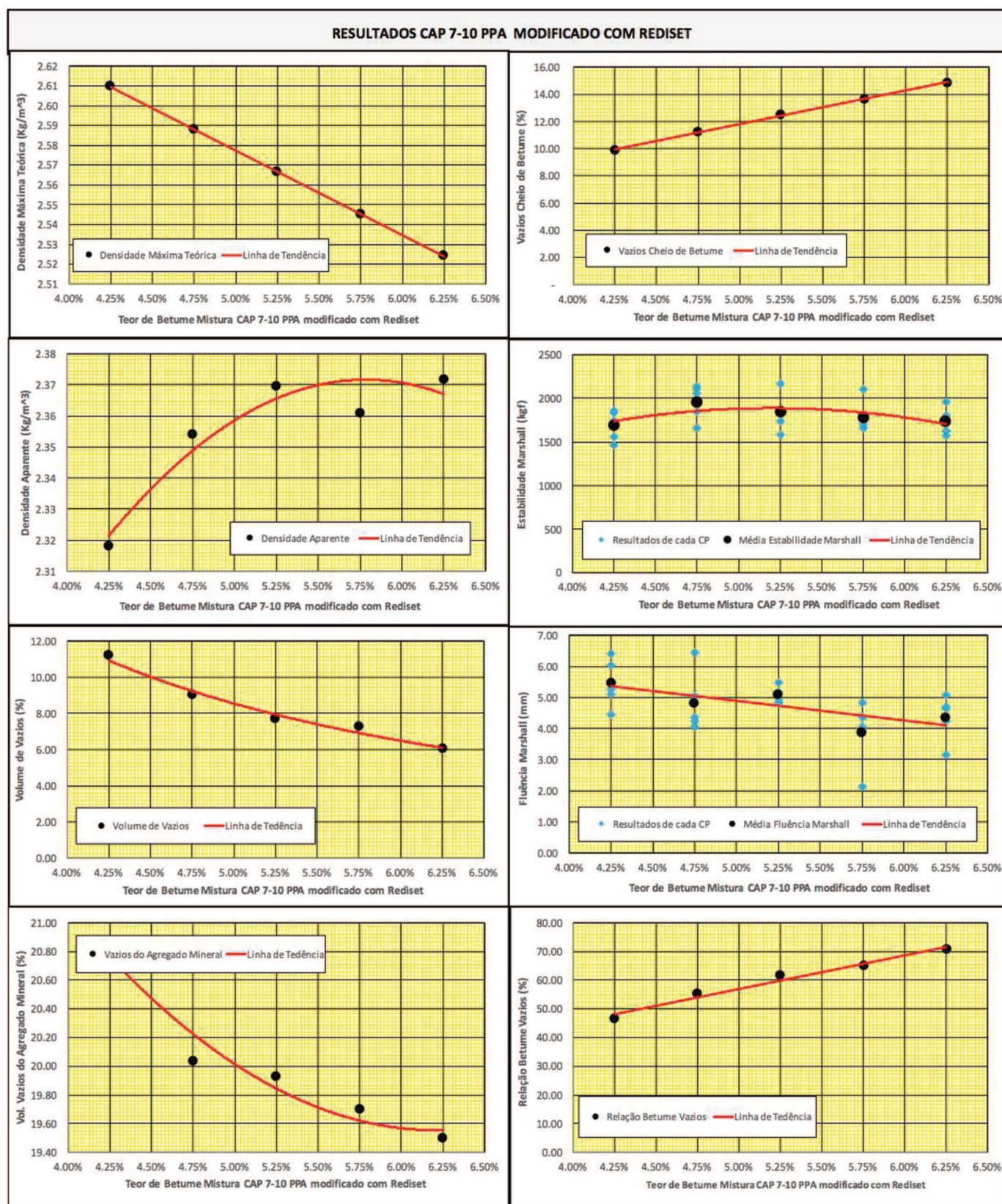
Para melhor visualização dos resultados, os gráficos destes parâmetros foram compactados e são apresentados nas Figura 52 e Figura 53.

Figura 52 - Gráficos de Resultados Marshall CAP 7-10 PPA



Fonte: AUTOR

Figura 53 - Gráficos de Resultados Marshall CAP 7-10 PPA mod. com Rediset



Fonte: AUTOR

Da análise dos gráficos que representam os resultados obtidos para a mistura asfáltica produzida com CAP 50-70 modificado com PPA e a produzida com CAP 50-70 modificada com PPA e Rediset se pode deduzir que:

- O valor máximo de estabilidade se encontra num teor próximo do 5.5% para a mistura asfáltica com PPA e do 5.25% com PPA e Rediset;
- A fluência apresentou maior susceptibilidade em quanto ao teor de ligante na mistura modificada com PPA e Rediset do que na mistura modificada apenas com PPA;
- A percentagem de vazios apresentou maior susceptibilidade em quanto ao teor de ligante na mistura modificada apenas com PPA do que na mistura modificada com PPA e Rediset.

4.4.2 TEOR DE TRABALHO DA MISTURA

A escolha do teor de trabalho da mistura asfáltica é o procedimento mais importante de qualquer metodologia de formulação de misturas asfálticas, e, no caso da metodologia Marshall, não é diferente. No entanto, como é amplamente conhecido nos meios científicos, esta metodologia apresenta inconsistências na sua concepção. Entre os problemas encontrados nesta metodologia se encontram:

- Energia de compactação utilizada (impacto);
- Sentido de solicitação, ou seja, no ensaio, os corpos de prova são compactados na diretriz e ensaiados na geratriz;
- Sinal de solicitação.

Como já citado, existem várias formas de obter o teor de trabalho pela Metodologia Marshall (BERNUCCI *et al.*, 2008). Segundo os princípios conceptivos estabelecidos na metodologia citada, para encontrar este teor existem várias maneiras de determinar este valor tendo em conta parâmetros volumétricos. De todas as maneiras apresentadas no item 2.6.2 a que mais se aproxima de uma maneira técnica é através da análise e interpretação dos gráficos representativos do ensaio Marshall.

É importante ressaltar que a escolha do teor de trabalho da mistura asfáltica não deve só obedecer ao resultado dos parâmetros físicos das misturas asfálticas, como sugerido pela metodologia Marshall. Esta escolha deve obedecer a um conjunto

de resultados, incluindo parâmetros comportamentais da mistura, tendo em conta a solicitação da mesma e sendo feito uma real aproximação ao que acontece no campo.

Levando literalmente o processo estabelecido na metodologia Marshall, o teor de trabalho encontrado para ambas as misturas se encontraria próximo ao 6,5% ou 7% de ligante asfáltico. Porém, durante esta pesquisa, não foram seguidos ditos princípios, por considerar que esta percentagem não seria representativa do teor ótimo de ligante para as misturas asfálticas ensaiadas. No referente a esta pesquisa, a motivação para a não adoção dos princípios estabelecidos na metodologia Marshall para a escolha do teor de trabalho se fundamenta principalmente em:

- Durante o processo de mistura dos granulares com o ligante asfáltico, foi percebido que a trabalhabilidade do ligante asfáltico a partir de um teor de 5.75% de ligante é adequada para o correto envolvimento dos granulares;
- Os valores de maior estabilidade para as misturas asfálticas com PPA e com PPA e Rediset, tiveram seus valores mais altos nos teores de 5.5% e 5.75% respectivamente. Logo, a escolha de um teor de ligante superior a 6.25% (valor máximo estudado durante a pesquisa), diminuiria o valor da estabilidade máxima obtida para o mesmo.

Tendo em conta os motivos previamente apresentados, decidiu-se pela escolha de 6.25% como teor de trabalho para a mistura.

4.4.3 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO INDIRETA

O ensaio de Resistência a Tração Indireta (RTI) é executado com os corpos de prova produzidos com o teor ótimo de betume e conforme o procedimento descrito no item 3.5.4. É importante ressaltar que ambos os trios de corpos de prova moldados para este fim utilizaram o teor de betume de 6.25%.

Com os valores obtidos no ensaio a compressão simples e os parâmetros volumétricos dos corpos de prova, é possível identificar a força de tração indireta dada pela Expressão 14, apresentada no item 3.5.4. Os resultados são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados Ensaio de Resistência a Tração Indireta (RTI)

Resistência a Tração Indireta (Teor de trabalho da mistura = 6,25%)					
Mistura	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Resistência a Tração Indireta (Mpa)	Média RTI (Mpa)
CAP 7-10 PPA	62.30	101.50	2,069.00	2.08	2.11
	61.70	102.50	2,162.00	2.18	
	63.00	102.00	2,103.00	2.08	
CAP 7-10 PPA mod. Rediset	63.60	100.50	2,758.00	2.75	2.91
	61.20	101.00	2,885.00	2.97	
	60.90	101.50	2,929.00	3.02	

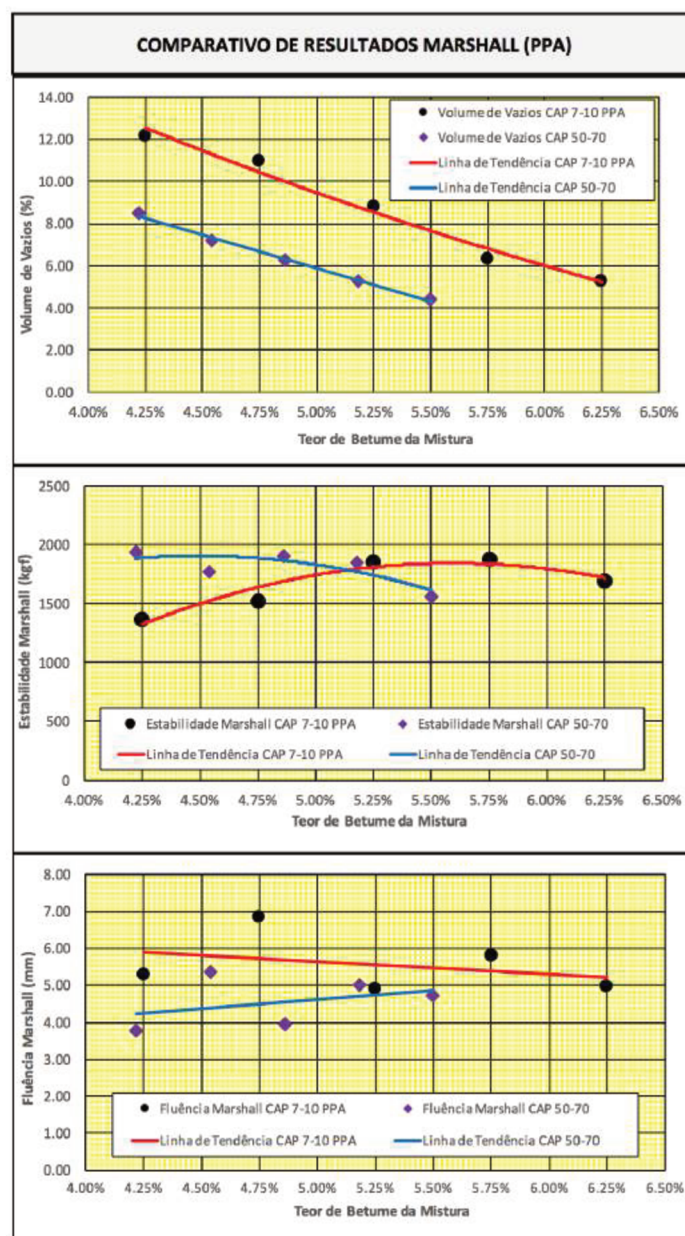
Fonte: AUTOR

4.5 COMPARATIVO DE RESULTADOS COM ESTUDOS PRÉVIOS

Baseado nos resultados apresentados neste capítulo e nos dados referenciados no capítulo 2 como estudos prévios é possível elaborar gráficos comparativos.

Na Figura 54, se encontram comparativos entre as misturas com CAP 7-10 PPA e seu ligante primitivo, o CAP 50-70, o último analisado por Zagolin (2016). Como já citado, as misturas foram elaboradas com a mesma curva granulométrica e com o material granular oriundo do mesmo fornecedor.

Figura 54 - Comparativo CAP 50-70 / CAP 7-10 PPA



Fonte: AUTOR

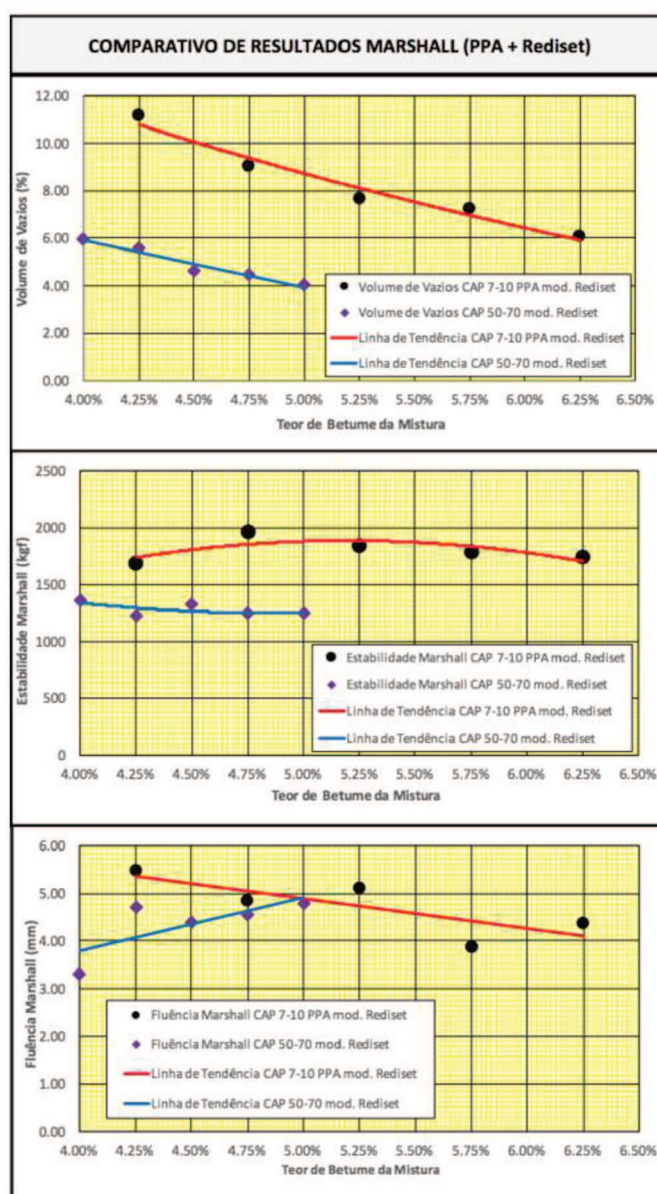
Pela análise dos gráficos da Figura 54, é possível concluir que:

- Gráfico 1, Volume de Vazios: Nota-se que neste gráfico a susceptibilidade do volume de vazios em relação ao teor de betume de ambas as misturas apresentam grande similaridade, embora o volume de vazios da mistura com o ligante convencional apresente porcentagens menores;
- Gráfico 2, Estabilidade Marshall: Pelo gráfico de estabilidade, é possível perceber a similaridade nos valores máximos de ambas as misturas. Porém, com o ligante modificado o pico de estabilidade se desloca para um

maior teor de betume. Isto significa que com a incorporação de PPA no ligante asfáltico não houve um ganho significativo de resistência ou de aumento no valor da estabilidade, porém, houve um deslocamento nos valores máximos encontrados, o que implica numa maior percentagem de ligante utilizada para se poder alcançar a máxima estabilidade.

A Figura 55, a seguir, apresenta os mesmos comparativos que a Figura 54, entretanto, nesta, as misturas analisadas são as com o CAP 7-10 PPA modificado com Rediset, e a com CAP 50-70 modificado com Rediset, produzido e analisado por Gumiel (2015).

Figura 55 - Comparativo CAP 50-70 mod. Rediset / CAP 7-10 PPA mod. Rediset



Fonte: AUTOR

Pela análise dos gráficos da Figura 55, é possível realizar algumas conclusões:

- Gráfico 1, Volume de Vazios: Observa-se que a susceptibilidade do volume de vazios quanto ao teor de ligante asfáltico é similar, porém, os valores encontrados para a mistura modificada com PPA foram superiores;
- Gráfico 2, Estabilidade Marshall: Neste gráfico, nota-se um ganho no valor da estabilidade para a mistura asfáltica modificada com PPA e Rediset em comparação com CAP convencional modificado exclusivamente com Rediset.

Por fim, o comparativo entre os Ensaios de Resistência a Tração Indireta (RTI) das misturas elaboradas com o aditivo surfactante Rediset é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Comparativo RTI misturas com Rediset

Comparativo Resistência a Tração Indireta		
Mistura	Resistência a Tração Indireta (Mpa)	Média RTI (Mpa)
CAP 50-70 mod. Rediset	1.48	1.55
	1.61	
	1.56	
CAP 7-10 PPA mod. Rediset	2.75	2.91
	2.97	
	3.02	

Fonte: AUTOR

Percebe-se pelos valores apresentados na Tabela 21 que houve um ganho de quase 90% de resistência a tração quando o PPA é adicionado a mistura asfáltica.

É importante ressaltar que, embora o teor de trabalho da mistura deste estudo, 6,25%, seja diferente que o teor de trabalho escolhido por Gumiel (2015), 5,00%, os resultados RTI foram considerados passíveis de comparação devido ao fato de que, independente do teor de betume, estes foram selecionados como teores de projeto que, teoricamente, deveriam apresentar a melhor combinação de parâmetros para uma determinada mistura.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após todas as etapas, ensaios, caracterizações, análises e comparativos apresentados, entende-se por cumprido os objetivos, tanto geral, quanto específicos deste trabalho.

No referente exclusivamente a metodologia de dosagem utilizada, embora popular no Brasil, a Metodologia Marshall possui diversas brechas científicas na sua concepção. Esta metodologia foi elaborada há muitos anos e tem apresentado poucos avanços desde então. Sendo assim, se faz necessário a utilização de novas metodologias de base científica, que procurem analisar o real comportamento dos materiais frente aos diferentes níveis de solicitação e temperaturas de condicionamento, para desta forma, ter em conta o comportamento do material a ser utilizado no projeto e não as características físicas dos corpos de prova, como é comumente utilizado em várias metodologias.

A metodologia Superpave, embora ainda muito empírica, apresenta resultados e comportamento em campo superiores a metodologia Marshall. Isso ocorre devido, principalmente, ao método de compactação da metodologia que, como a Francesa, se dá por amassamento, e ainda devido as grandes espessuras adotadas para as camadas de revestimento e binder. Por outro lado, a metodologia Francesa de formulação de misturas asfálticas surge como uma alternativa viável para a análise das misturas tendo em conta parâmetros mecânicos mais convincentes, aplicando critérios menos empíricos na sua concepção e fazendo uso de ensaios que refletem o real comportamento no campo e que tem uma estreita e comprovada relação campo-laboratório.

O estudo de ligantes aditivados requer um aprofundamento conceitual mais extenso, ensaiando e tratando dados reológicos, mecânicos e químicos de seus componentes. Desta forma, é possível conhecer o comportamento e o grau de afetação que fornece a incorporação do aditivo dentro do material. Comentado isto, embora as limitações da metodologia, os resultados experimentais neste estudo possuem capacidade de assistir a busca pelo conhecimento do comportamento das misturas asfálticas aditivadas com ácido polifosfórico (PPA) e com PPA e Rediset.

Em relação ao Rediset, a partir da metodologia de ensaios adotada, se conclui que o aditivo surfactante não ocasionou grandes influências no que diz respeito a estabilidade e fluência Marshall, quando comparado com o ligante produzido apenas com PPA. Porém, a ação mútua dos dois provocou variações em alguns parâmetros

de caracterização do mesmo. Ainda sobre o Rediset, os resultados do ensaio de Resistência a Tração Indireta apresentam valores até 35% maiores que os da mistura apenas com PPA.

Quando a variável das misturas se torna o ácido polifosfórico, os resultados, comparados a estudos prévios, mostraram um comportamento um tanto quanto caótico provindo da modificação com o PPA. Além de uma necessidade de um teor de betume maior para atingir os mesmos valores de volume de vazios, a modificação não proporcionou valores de estabilidade e fluência Marshall superiores ao CAP convencional, tornando-a pouco útil. Já para o comparativo entre o ligante modificado com PPA e, então, aditivado com Rediset, a existência do primeiro aditivo na mistura se tornou relevante. Embora a mistura com PPA e Rediset ainda apresentasse um volume de vazios superior a mistura apenas com Rediset, a estabilidade e fluência Marshall apontaram grandes melhoras em quase todos os teores de betume analisados. Vale ressaltar que, para aceitar ou rejeitar qualquer tipo de tecnologia se faz necessário a realização de uma extensa bateria de ensaios que permita avaliar de maneira apropriada a influência do produto nas características comportamentais. Sendo assim, os resultados apresentados nesta pesquisa geram um indicativo do como a tecnologia empregada afeta o comportamento da mistura, contudo, se faz necessário a realização de ensaios mecânicos que reflitam melhor o comportamento do material.

Tratando-se, especificamente, do ácido polifosfórico (PPA), é recomendado um estudo baseado nas interações químicas entre o aditivo e o ligante, além da análise comportamental do ligante quando modificado com uma alta taxa do ácido. Esta recomendação é baseada no fato de que o ligante estudado provém de uma mistura de CAP 50-70 com uma taxa de ácido polifosfórico não divulgada pela empresa fornecedora, mas grande o bastante para enrijecer o ligante a mais de 85% da sua penetração original.

Embora este estudo não tenha base econômica, se sugere ainda uma pesquisa de custos para este tipo de modificação, visto que a porcentagem de CAP a ser adicionado a mistura foi elevada consideravelmente devido a presença do ácido polifosfórico. Embora a modificação de aditivos possa ter trazido alguns resultados com valores de resistência mais elevados, o custo para a usinagem deste mesmo material em condições aprobatórias à norma pode se tornar excessivo e inviável.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7809/87: **Agregado Graúdo Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**. São Paulo, SP, Brasil, 1987.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6296/2004: **Determinação da massa específica real de ligantes betuminosos**. São Paulo, SP, Brasil, 2004.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. 7. ed. Asphalt Institute, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

BARRA, B. S. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do Estado do Pará com o emprego de pó calcário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

BAUMGARDNER, G. L. **Why and How of Polyphosphoric Acid Modification: An Industry Perspective**. Transportation Research Circular, n. E-C160, 2012.

BAUMGARDNER, G., L, MASSON, J-F, HARDEE, J.R, MENAPACE, A.M., WILLIAMS, A.G., **Polyphosphoric Acid Modified Asphalt: Proposed Mechanisms, Canada**, 2005.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

DNER-ME 04/94. **Material Betuminoso: Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol à Alta Temperatura**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 043/95. **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1995.

DNER-ME 078/94. **Agregado - adesividade a ligante betuminoso.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 35/98. **Agregados: Determinação da Abrasão Los Angeles.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 81/98. **Agregados: Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 84/95. **Agregado Miúdo: Determinação da Densidade Real.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1995.

DNER-ME 89/94. **Agregados: Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT-EM 095/2006. **Cimentos asfálticos de petróleo.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT-ES 031/2006. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT-ME 117/94. **Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT-ME 131/2010. **Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT-ME 136/2010. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT-ME 155/2010. **Material asfáltico - Determinação da penetração.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT, **Manual de Pavimentação.** Editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). 2a Edição. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. **Comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com copolímero SBR e ácido polifosfórico.** TRANSPORTES v. 23, n. 2, p. 56-64, 2015.

DOURADO, E. R. **Análise de superfícies de ligantes asfálticos convencionais e modificados.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

FERNANDES, P. R. N.; ALENCAR, A. E. V. **Avaliação de ligante asfáltico brasileiro processado na unidade de negócios da PETROBRÁS- lubnor puro e modificado com ácido polifosfórico.** Maceió, 2011.

GUERRERO, Y. A. P. **Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas.** Florianópolis, 2013.

GUMIEL, J. **Avaliação da adição de Rediset e Evotherm na estabilidade e fluência das misturas asfálticas em laboratório.** Joinville, 2015.

ICL ADVANCED ADDITIVES. **Quando o desempenho é importante.** Missouri, 2015.

MAGALHÃES, S. T. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho.** Rio de Janeiro, 2004.

MOTTA, R. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético.** São Paulo, 2011.

OTTO, G. G. **Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. **Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125.** Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2007.

RÜHL, R. **Lower temperatures: The best for asphalt, bitumen, environment and health and safety.** In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 4., 2008, Copenhagen. Anais... 2008.

SIROMA, R. S. **Estudo da utilização de areia descartada de fundição (ADF) na formulação e no desempenho mecânico de misturas de concreto asfáltico.** Joinville, 2016.

ZAGOLIN, P. **Influência do ligante betuminoso na dosagem e no comportamento mecânico de misturas asfálticas densas.** Joinville, 2016.